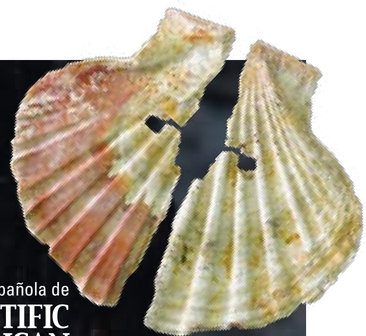
AGOSTO 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

FUTURO
12 acontecimientos que cambiarían el mundo

NEUROCIENCIA
Tratamiento precoz del alzheimer

FISICA
¿Es el tiempo una ilusión?

EVOLUCION
Pensamiento simbólico de los neandertales

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

FUEGO Y VIDA

Los incendios moldean la historia de los bosques mediterráneos





SUMARIO

Agosto de 2010/ Número 407

46

El dióxido de carbono extraído del aire podría destinarse a aplicaciones industriales.



12

¿Qué cambios aguardan a la humanidad?



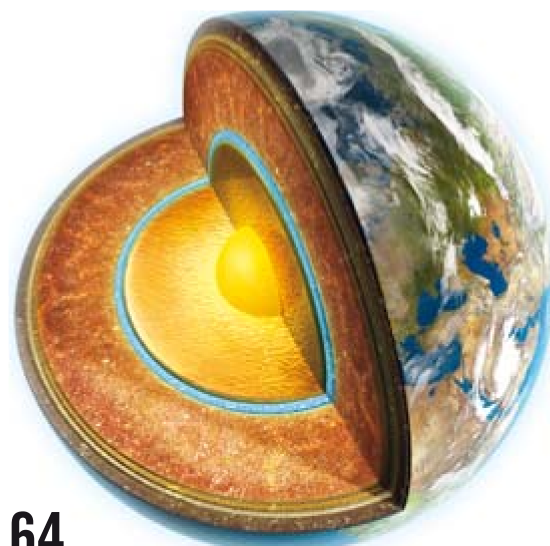
24

Los fármacos actuales contra el alzheimer tratan los síntomas cognitivos, pero no la patología subyacente.

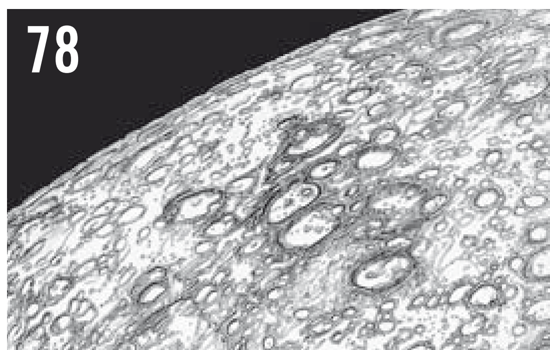
ARTICULOS



En los ecosistemas con incendios de copa abundan las especies germinadoras.



Nuevos descubrimientos sobre la estructura interna de nuestro planeta.



La invención del telescopio dio origen a los primeros intentos de caracterizar la topografía lunar.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
COORDINADORA DE EDICIONES Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza
Ernesto Lozano Tellechea
Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Clonación de un humano, Conflicto nuclear, Pandemias mortíferas, Creación de vida, Superconductividad a temperatura ambiente, Máquinas conscientes, Fusión de los casquetes polares, Terremotos en el Pacífico, Energía de fusión* y *Ciencia y sociedad*; Ramón Pascual: *Dimensiones extra*; Mª Rosa Zapatero Osorio: *Inteligencia extraterrestre, Impacto de un asteroide*; Juan M. González Mañas: *Anticiparse al alzheimer*; Angel Garcimartín: *¿Es el tiempo una ilusión?*; Carlos Lorenzo: *¿Pensaban los neandertales como nosotros?*; Fabio Teixidó: *El ingrediente secreto de la Tierra*; Mercé Piqueras: *Botox falsificado, una amenaza real*; Teodoro Vives: *Orígenes y desarrollo de la cartografía lunar*; J. Vilardell: *Hace...* y *Curiosidades de la física*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Marián Beltrán: *Apuntes* y *Desarrollo sostenible*



Portada: © *iStockphoto/*Jamie VanBuskirk

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euros	120,00 euros
Resto del mundo	100,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



La facultad de ver

En "Lateralización del cerebro" de Peter F. MacNeilage, Lesley J. Rogers y Giorgio Vallortigara (septiembre 2009), se mencionan los experimentos de Rogers en los que se mantiene en la oscuridad unos embriones de pollo, de tal manera que su ojo derecho no recibe estimulación y por tanto el hemisferio cerebral izquierdo no se desarrolla con normalidad. En los humanos, la información procedente del campo visual izquierdo de cada ojo se procesa en el hemisferio derecho, y viceversa. En los pollos no pasa lo mismo, ¿arroja este hecho dudas sobre las conclusiones de Rogers?

George F. Feissner
Cortland, estado de Nueva York

RESPONDEN LOS AUTORES: *La transmisión al cerebro de la percepción ocular difiere entre aves y humanos. En un ave, cada ojo controla casi la totalidad del hemisferio opuesto; en nuestra especie, en cambio, es la parte izquierda del campo visual centrado en el punto de enfoque la que se percibe en el lado derecho del ojo y después activa el mismo hemisferio cerebral, y a la inversa. Esta diferencia es irrelevante en cuanto a nuestra afirmación sobre la eficiencia relativa del cerebro del ave, ya sea lateralizado o no. Simplemente señala que, cuando no se ha creado lateralización, el cerebro del ave es menos apto para competir por alimentos y huir de los predadores.*

Vientos de cambio

Me sorprendió que en "Energía sostenible: Objetivo 2030" (enero de 2010) Mark Z. Jacobson y Mark A. Delucchi no mencionasen los efectos sobre el clima de las fuentes de energía sugeridas. Los autores proponen absorber una energía del orden de seis terawatt de los cerca de sesenta que ofrece el viento, es decir, en torno al diez por ciento de la energía total. Dado que los vientos suelen circular por las cumbres o los valles, donde la velocidad y la fuerza de Coriolis asociada tienden a mantener la diferencia de presión, me resulta fácil imaginar que la absorción de energía variará el ritmo de colapso de los centros de presión. No sé de qué modo cambiaría el clima, pero la energía que obtenemos tiene que modificarlo de alguna manera. Tal vez el cambio climático fuera favorable, pero como fiel creyente en la ley de Murphy me sorprendería. Cien años atrás se justificaba el vertido de desechos al mar en razón de la inmensidad del océano frente al perjuicio infligido, y nadie analizaba hasta dónde se podía llegar. ¡Seamos hoy más perspicaces y hagamos los cálculos antes de crear más problemas!

Paul Roetling
Grand Island, Nueva York

Jacobson y Delucchi adoptan un enfoque audaz en el que las oportunidades y dificultades suelen compensarse. Tres puntos, sin embargo, deberían tratarse más a fondo. Primero, las vastas redes fotovoltaicas de los desiertos sufrirían graves pérdidas de rendimiento en las tormentas de arena. Segundo, como en la década de los años setenta señalaban unos detallados estudios sobre el diseño de aeronaves propulsadas por hidrógeno líquido, los sistemas de energía que necesitan los grandes aeropuertos y las dificultades de dar servicio a aeronaves cuyos sistemas están a tres kelvin de temperatura, es posible que tales problemas lleguen a resolverse, pero cuesta mucho creer que ello sea antes de 2030. Tercero, y probablemente el más grave, la construcción de estos nuevos sistemas de energía es unas 10 veces más rápida que lo han sido las introducciones anteriores de sistemas de energía y transporte en el mundo. A lo largo de un siglo todos los sistemas nuevos de abastecimiento global han crecido a un ritmo del 1 al 2 por ciento anual, mientras que el artículo supone una tasa del 5 por ciento anual. Por supuesto, los autores comparan los anteriores índices de construcción nueva con los que ellos proponen, pero no lo han hecho en el ámbito mundial. Las nuevas tecnologías que no lleguen a cubrir el 2 o 3 por ciento de la presión de mercado perdida, caerán en el "foso de los reptiles" y se abandonarán.

John E. Allen
Universidad de Kingston, Londres

RESPONDEN LOS AUTORES: *Las tormentas de arena azotan esencialmente el Sahara, los estados del golfo Pérsico y el desierto de Gobi, pero apenas contribuyen a reducir la radiación solar en América del Norte o del Sur, o en Australia. En casos graves, la energía solar sufre un descenso en dichas regiones desérticas, pero incluso allí el promedio anual de la radiación que llega a la tierra se mantiene elevado por el carácter estacional de esos fenómenos. En cuanto al segundo punto, proponemos que el transporte utilice mayoritariamente electricidad. Sólo en los casos en que ello no sea posible proponemos vehículos híbridos de hidrógeno o de hidrógeno-eléctricos. El transporte aéreo es probablemente el sector más difícil de abordar; sin embargo, un informe reciente de la Comisión Europea sugiere que "no existen barreras esenciales para la realización" de una flota aérea propulsada por hidrógeno líquido (http://ec.europa.eu/research/transport/news/article_786_en.html). Aunque el hidrógeno líquido requiere más de cuatro veces el volumen que necesita un combustible de reactor para producir la misma energía, su peso es sólo una tercera parte, lo que compensa de sobra el peso adicional del depósito de combustible. De ahí que un avión propulsado por hidrógeno líquido produzca una tracción mayor pero pese menos que uno de reactor convencional. En cuanto al tercer punto, pretendemos que los gobiernos promuevan con rapidez cambios en las infraestructuras. Los ejemplos citados en la carta se basan en una penetración de mercado típica, no en actuaciones contundentes.*

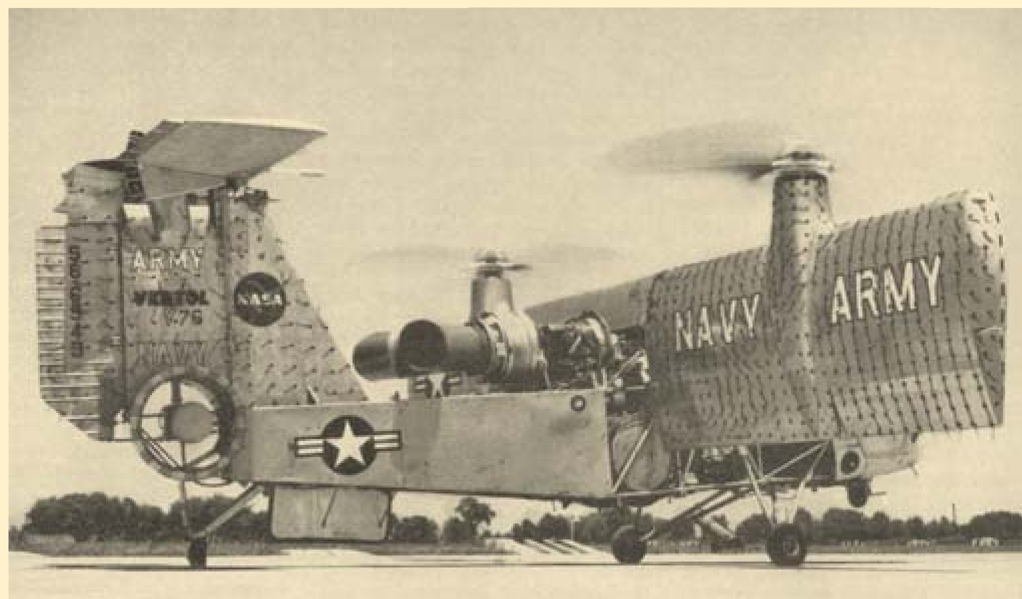
Errata corrige

En el artículo "Yuca mejorada contra el hambre", del mes de julio, en la página 58, se dice que la lisina es un aminoácido sulfurado, cuando en realidad no contiene azufre.
La fotografía de la salina de Uyumi, en la página 12 del mismo número, es cortesía de Luca Galuzzi.

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Hacia arriba. «Tanto aquí como en el extranjero se están realizando intensas investigaciones en torno al avión de despegue y aterrizaje vertical. En nuestro país, el programa es fruto de una colaboración a tres bandas entre la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio, un grupo de fabricantes de aviones y las fuerzas armadas. Los requisitos del tráfico comercial de pasajeros no constituyen el único impulso, ni siquiera el más importante, que mueve las investigaciones. El Ejército, la Marina y la Fuerza Aérea están interesados en unas gamas de aeronaves que pudieran operar en zonas avanzadas sin necesidad de unas pistas de aterrizaje adecuadamente preparadas. En estudio hay aviones interceptores, de reconocimiento y de transporte. Hasta ahora, en lo que atañe a los aviones de carga, resultan obvias sus posibles aplicaciones civiles y militares.»



AVION DE DESPEGUE VERTICAL: La nueva técnica de ala basculante, 1960.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 203, N.º 2, AGOSTO DE 1960

...cien años

Bosques e inundaciones. «En fecha reciente se ha recrudecido, en Europa y en América, la vivaz polémica verbal acerca de la influencia de los bosques en el caudal de los ríos. Al leer lo escrito sobre tan intrincado problema, impresiona la gran cantidad de teorías elaboradas sobre tan escasa base factual. Ello ha llevado a la Oficina Meteorológica y al Servicio Forestal estadounidenses a acometer conjuntamente una serie de investigaciones ideadas para obtener una información precisa al respecto. En dos cuencas hidrográficas de topografía similar cercanas a Wagon Wheel Gap (Colorado) se llevará a cabo un estudio exhaustivo sobre los efectos de la cubierta forestal en el caudal de los ríos, la erosión, la distribución de sedimentos, etcétera. Se pretende medir el caudal de las dos corrientes durante un periodo de ocho o diez años; a continuación se cortará la vegetación de una de las cuencas, y las mediciones proseguirán durante ocho o diez años más, de modo que puedan determinarse perfectamente los efectos de la denudación.»

[NOTA: El proyecto Wagon Wheel Gap fue el primer experimento controlado en EE.UU. sobre la influencia de los bosques en el caudal de los ríos. La deforestación aumentó el caudal, pero al cabo de siete años la vegetación regenerada volvió a reducirlo en buena medida.]

Moneda liviana. «El gobierno francés ha decidido no acuñar moneda de aluminio. A título de prueba se fabricaron algunas monedas de ese metal, pero su escaso peso, que se aducía como una de sus principales virtudes, lo ha condenado. Una pieza de cinco céntimos (un centavo) de aluminio pesaba sólo 1,9 gramos, frente a los cinco gramos de la de bronce. Se cree que una moneda tan liviana se deslizaría y escaparía por entre los dedos, en especial los ásperos dedos de un obrero.»

...ciento cincuenta años

El faro de Minot's Ledge. «Se espera que el nuevo faro del litoral de Massachusetts quede terminado y se encienda en la primera semana del mes próximo. El primer golpe de piqueta sobre el peñasco en que se ha erigido el faro se dio el 12 de junio de 1858. El antiguo faro de hierro fue barrido por la terrible tempestad de abril de 1851 (junto con los dos fareros de servicio en aquel momento). Durante las numerosas e intensas tempestades del invierno pasado, el nuevo faro estuvo expuesto al despiadado batir de las olas del embravecido Atlántico sin que ni una piedra ni una junta se movieran. Habiendo superado esa situación de desprotección y resistido a la intemperie, nada podrá con él una vez terminado.»

[NOTA: El faro sigue todavía en pie y fue automatizado en 1947.]

Problemas con Darwin. «En la Sociedad Británica para el Progreso de la Ciencia, el trabajo de nuestro conciudadano profesor Draper sobre el desarrollo intelectual de Europa, considerado con referencia a las opiniones últimamente difundidas por el doctor Darwin, ha concitado tal vez uno de los mayores entusiasmos y encendidas discusiones.

El doctor Draper demostró que los avances de la humanidad se deben a influencias externas y no internas, y que a ese respecto una nación es como una semilla, que sólo puede desarrollarse cuando las condiciones son favorables; que las

características y la supervivencia de todos los organismos, incluido el hombre, dependen de las condiciones físicas bajo las que viven; que la evidente invariabilidad actual del mundo es consecuencia directa del equilibrio físico; pero que si este último se alterara, en un instante la descabellada doctrina de la inmutabilidad de las especies se vería reducida a los que realmente es.»

Darwin contraataca. «La ponencia anterior atrajo una enorme audiencia. Sir Benjamín Brodie afirmó que él no podía suscribir la hipótesis del doctor Darwin. El hombre posee conciencia de sí mismo, rasgo que le distingue del mundo material. Esa capacidad humana sería idéntica a la inteligencia divina; y pensar que ello pudiera originarse de la materia implica el absurdo de suponer que el origen del poder divino depende de la organización de la materia.

El docto y venerable obispo de Oxford afirmó que la teoría darwinista, al contrastarse con los principios de la ciencia inductiva, se vino abajo. La permanencia de la forma especifica representaba un hecho confirmado por todas las observaciones. Los restos de animales, plantas y hombres hallados en esos primeros testimonios de la raza humana (las catacumbas egipcias) se identifican con las formas existentes y apuntan a la irresistible tendencia de los seres organizados a adoptar unas características inalterables.

El famoso botánico doctor Hooker, a quien se había invitado para que expresase sus opiniones, comentó que éstas concordaban con las del señor Darwin y que el obispo de Oxford no las entendía.

El señor Darwin parece haber sembrado la discordia en el mundo científico; no es cosa fácil comprender lo que él realmente quiere decir.»

Aún digno de confianza. «Hace diez años que compro su revista; su máxima cualidad es, en mi opinión, su absoluta solvencia y la total ausencia de paparruchas y embustes. No me parece que nadie pueda sobornarles para decir que un papel cazamoscas atrapa más moscas y de mayor tamaño que otro papel cazamoscas.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 1, N.º 1, 28 DE AGOSTO DE 1845

FELIZ CUMPLEAÑOS

"Nueva York, jueves, 28 de agosto de 1845" era la fecha que figuraba en el primer número de *Scientific American: The Advocate of Industry and Enterprise, and Journal of Mechanical and Other Improvements*. Por dos dólares al año se prometía a los lectores un semanario de gran formato que trataría de "Nuevas invenciones, principios científicos y trabajos curiosos". Ahora, 165 años después, *Scientific American* ha sufrido tantos cambios como los campos que abarca, pero sigue esforzándose al máximo para proporcionar la mejor información sobre las nuevas invenciones, el avance de la teoría científica y, en ocasiones, los trabajos curiosos. He aquí una muestra de lo que ocurría un mes como éste hace 165 años.

EL TELEGRAFO DE MORSE. «El uso de esta maravilla de nuestro tiempo, que lleva funcionando hace meses entre Washington y Baltimore, tal vez se generalice a lo largo y ancho del país. Los comerciantes de nuestros estados occidentales están considerando cursar a partir de ahora sus pedidos por telégrafo, prescindiendo de los tediosos y lentos vagones del ferrocarril.»

CENTRIFUGA. «El señor Joseph Hurd, de Shoreham (Vermont), ha conseguido una cédula de invención para un aparato que separa o aclara líquidos mediante la aplicación de fuerza centrífuga. Es un hecho sobradamente conocido que el mucílago o los azúcares, así como las sustancias minerales y salinas, poseen un peso específico superior al del agua.»

LA ERA DEL VAPOR. «El barco de vapor *Great Britain*, el gigante de los océanos recientemente arribado desde Liverpool, ha suscitado aquí la misma excitación que en Europa; representa de hecho la mayor curiosidad naval hasta ahora vista en nuestro puerto. Construido en los Astilleros Great Western, de Bristol (Inglaterra), es de hierro en su totalidad. Durante los pocos días desde su llegada a Nueva York, lo han visitado unas 12.000 personas, que han pagado 25 centavos por la atracción. Si hay algo objetable en la construcción o maquinaria de este majestuoso buque es su propulsión por hélice; y no nos extrañaríamos si, dentro de poco, ésta fuera reemplazada por ruedas de paletas en los costados.»



AVANCE A TODO VAPOR: El *Great Britain*, primer barco de vapor de dimensiones gigantescas de Isambard Kingdom Brunel, en un grabado del primer número de *Scientific American*, de 1845.

MEDIOAMBIENTE

Plásticos más fáciles de reciclar

La mayoría de las botellas de plástico que se tiran a la basura pueden reciclarse (las que llevan impreso el número uno dentro de una flecha triangular). Sin embargo, el plástico de segunda generación no suele poderse usar para fabricar nuevos envases. Acaban de descubrir una forma de fabricar botellas de plástico que aumentaría las posibilidades de reciclado.

El problema con los envases de termoplástico de tereftalato de polietileno (PET, según sus siglas en inglés) es que la fabricación suele precisar catalizadores de óxidos o hidróxidos metálicos. Estos catalizadores permanecen en el material reciclado y lo van debilitando, haciendo que no resulte práctico reutilizarlo para obtener una tercera generación de envases. En su lugar, el PET de segunda generación se usa para aplicaciones menos exigentes, como alfombras y relleno fibroso para abrigos y sacos de dormir. O se tira a la basura. En los EE.UU., casi veinticuatro mil millones de contenedores de plástico para bebidas se han incinerado, se han utilizado a modo de rellenos para obras o simplemente se han tirado en vertederos durante el primer trimestre del año, según el Instituto para el Reciclaje de Envases de Culver City, California, una entidad sin ánimo de lucro.



Un equipo del Centro de Investigación Almaden de IBM, en San José, California, y de la Universidad de Stanford, informa, en el número del 16 de febrero de la revista *Macromolecules*, que ha creado una familia de catalizadores orgánicos que podría utilizarse para hacer que los plásticos sean totalmente biodegradables y reciclables. Dichos catalizadores pueden competir incluso con los catalizadores basados en metales, que son muy activos, mientras que añaden la ventaja de ser inocuos para el entorno. Según los autores del estudio, quizá podría desarrollarse un método de reciclaje que dividiera los polímeros en sus monómeros constituyentes, para así reutilizarlos.

—*Larry Greenemeier*

BIOLOGIA

Modelos matemáticos y sistemas biológicos

Los sistemas biológicos han de ser "robustos"; es decir, deben exhibir un mismo comportamiento ante una gran variedad de circunstancias posibles o condiciones de desarrollo. La robustez, un concepto muy empleado pero poco comprendido, se trata de un comportamiento colectivo coordinado que emerge con independencia de los detalles y condiciones de los constituyentes.

En marzo, Guy Shinar, del Instituto Científico Weizmann, y Martin Feinberg, de la Universidad estatal de Ohio, demostraron en la revista *Science* un teorema matemático que establece condiciones generales bajo las cuales un sistema biológico exhibe "robustez de la concentración absoluta". Esta se da cuando la concentración de una especie activa (una proteína, por ejemplo) se estabiliza siempre en un mismo valor para cualquier estado estacionario futuro del sistema y con independencia de las concentraciones del resto de las especies presentes.

El teorema de Shinar y Feinberg explica la robustez de algunos sistemas biológicos en los que ya se había observado semejante comportamiento, como el mecanismo de osmorregulación EnvZ-OmpR de *Escherichia coli* (consistente en un "sensor", la quinasa EnvZ, y un "regulador de respuesta", OmpR).

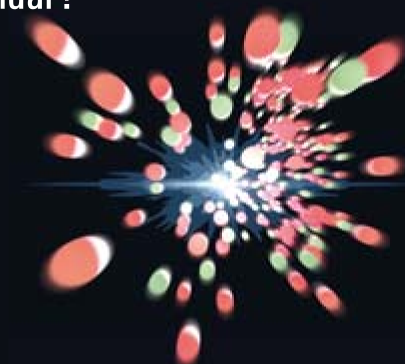
—*Science*

FISICA DE PARTICULAS

¿Más allá del modelo estándar?

El pasado mes de mayo, la colaboración internacional DZero, del acelerador de partículas Fermilab (EE.UU.), anunció resultados experimentales que apuntan a una asimetría entre materia y antimateria superior en un uno por ciento a la predicha por el modelo estándar (ME) de física de partículas. En concreto, una diferencia entre la cantidad de muones y antimuones generados en la desintegración de mesones B.

El universo contiene mucha más cantidad de materia que de antimateria, pero la razón por la cual la naturaleza "prefiere" las partículas a las antipartículas sigue siendo uno de los misterios más profundos de la física teórica. El ME, la teoría vigente de partículas elementales —cuyas predicciones han sido confirmadas durante decenios—, deja un pequeño hueco para esa asimetría. Sin embargo, los mecanismos predichos por el ME resultan insuficientes para explicar la abundancia de materia observada en el cosmos.



SE DESCONOCE por qué el universo contiene más materia que antimateria. Un experimento reciente parece contradecir las predicciones del modelo estándar.

Como siempre en física de partículas, el resultado hallado por la colaboración DZero posee un valor puramente estadístico. No obstante, los expertos del Fermilab han calculado que la probabilidad de que los resultados experimentales sean compatibles con las predicciones del ME es inferior al 0,1 por ciento.

—*Fermilab*

JOHN BLOCK *Getty Images (papelera)*

ANTROPOLOGIA

¿Es necesario gatear?

Padres y pediatras coinciden en que los bebés deben gatear antes de caminar. Gatear también se ha considerado un requisito previo en la progresión normal de otros aspectos del desarrollo neuromuscular y neurológico, como la coordinación óculo manual y la maduración social. Pero investigaciones recientes ponen en tela de juicio esta creencia común.

Según el antropólogo David Tracer, de la Universidad de Boulder en Colorado, los bebés de los au, cazadores recolectores de Papua Nueva Guinea, no pasan por el estadio de gateo. Sus padres y otros cuidadores los llevan en brazos hasta que son capaces de caminar. Aun así, no parece que saltarse esta fase tenga efectos negativos en esos niños. De hecho, no gatear podría ser normal e incluso adaptativo.

Mediante la observación de 113 parejas de madres e hijos au, Tracer descubrió que hasta los 12 meses se transportaba a los bebés erguidos en portabebés el 86 por ciento del tiempo. En las raras ocasiones en que las madres dejaban al hijo en el suelo, lo colocaban sentado, no tumbado boca abajo. Los niños au pasan todo el tiempo erguidos y, como consecuencia, nunca aprenden a gatear. (Sin embargo, pasan por una fase de impulsión en la que desde la posición de sentados se impulsan con las nalgas hacia adelante. Los au creen que esta propulsión, más que el gateo, constituye la fase humana previa a caminar).

Los au no son los únicos que evitan que sus hijos gateen. A los bebés de muchas otras sociedades tradicionales (algunas de ellas en Paraguay, Malí e Indonesia) se los cría de la misma manera. Más aún, ninguno de nuestros parientes vivos más cercanos, los chimpancés y los gorilas, dejan a sus hijos en el suelo muy a menudo. Así pues, bien podría ser que nuestros ancestros homínidos tempranos transportaran en brazos a sus hijos en vez de dejarlos gatear.



GATEAR PODRIA CORRESPONDER a un estadio evolutivo reciente en el desarrollo del niño.

Una investigación sobre niños de Bangladesh mostraba que gatear aumenta de forma notable el riesgo de contraer diarrea. Tracer propone que llevar a los bebés en brazos reduce su exposición a los patógenos del suelo; también los protege de los predadores. El estadio de gateo sería, por tanto, un invento reciente, que habría surgido hace sólo uno o dos siglos, después de que los humanos empezaran a vivir en casas elevadas provistas de suelos revestidos, más higiénicos.

Wenda Trevathan, antropóloga de la Universidad estatal de Nuevo México, coincide en que probablemente en el pasado a los niños casi no se les dejaba en el suelo. Y añade otro peligro: las brasas. Según Trevathan, el trabajo de Tracer destaca lo limitado de nuestra visión del desarrollo normal del niño y cuestiona la tendencia a juzgar a todos los bebés humanos según el estándar de los occidentales.

—*Kate Wong*

ACUSTICA

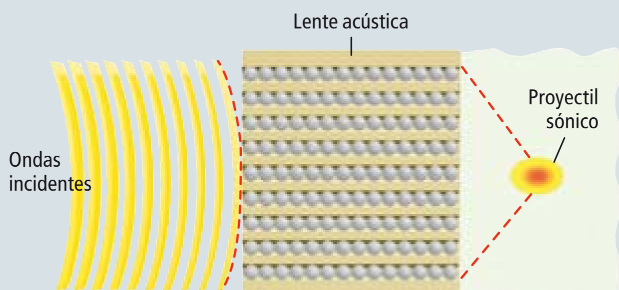
Ondas sonoras más potentes

La manipulación de las ondas sonoras ha facilitado el desarrollo de técnicas de gran importancia. Pensemos en las ecografías. Alessandro Spadoni y Chiara Daraio, del Instituto Tecnológico de California (Caltech), han creado un nuevo tipo de lentes acústicas que permiten aumentar la potencia de las ondas sonoras.

Las lentes acústicas concentran el sonido, de forma similar a como las lentes ópticas concentran la luz. En lugar de utilizar cristal y espejos, los expertos han diseñado una lente acústica mediante 21 filas de 21 esferas de acero inoxidable. Y en vez de lanzar ondas sonoras hacia la lente, lo que hacen es golpear la primera esfera de cada fila, de modo que se envía una onda de presión a lo largo de cada montón o fila. Para ajustar el foco de la lente, cambian la fuerza con la que la golpean (lo que afecta a la amplitud de las ondas) y el tamaño de las esferas (que modifica la longitud de onda). Las ondas se transmiten después a un objeto, como un miembro humano, en donde se concentra en un punto.

La capacidad de concentración mejoraría las ecografías, según Spadoni, que describió sus trabajos en línea, en el número del 5 de abril de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Más osados todavía serían los "proyectiles sónicos" para la cirugía no invasiva. La energía acústica calienta los tejidos, un efecto que ya se usa en la terapia hipertérmica. Las lentes acústicas no lineales del Caltech podrían aplicarse al tratamiento de tumores mediante el incremento de la temperatura del tejido canceroso hasta niveles letales sin afectar al tejido sano.

—*Larry Greenemeier*



DENNIS HALLIGAN *Getty Images* (*bebé*); GEORGE RETSECK (*lente acústica*)

Microplásticos

Pequeños restos de juguetes, botellas y envases continúan su vida en el mar

Hoy por hoy, todos sabemos que los desechos plásticos que generamos cada año —millones de toneladas— perdurarán en el entorno durante siglos. Las consecuencias también son conocidas: focas atrapadas en redes de nailon, nutrias marinas asfixiadas por aros de polietileno o tortugas con las entrañas obstruidas por bolsas o juguetes de plástico.

Esta fotografía muestra los fragmentos de plástico recogidos en tan sólo una hora en una cala cercana a Gloucester, en Massachusetts. Se trata de un peligro menos conocido pero no por ello menos inquietante: pequeños trozos de plástico que, cada vez en mayor medida, se acumulan en los mares de todo el mundo. Resultan lesivos para la vida marina y, posiblemente, también para la salud humana.

Aunque, a diferencia del papel o los restos de alimentos, los microorganismos no descomponen el plástico, éste sí se "fotodegrada" lentamente: la luz ultravioleta y el calor del Sol lo tornan quebradizo, con lo que el plástico se agrieta y se fragmenta con facilidad en pedazos cada vez menores. De hecho, un puñado de arena o un tazón de agua marina de casi cualquier parte del mundo contendrá microplásticos: partículas de plástico diminutas y a menudo invisibles. Se temen sus posibles efectos sobre el zooplancton y otras criaturas que, pertenecientes a la base de la pirámide trófica marina, son consumidos por organismos de mayor tamaño (tortugas, peces o aves) y, en última instancia, también por nosotros.

Las preocupaciones al respecto obedecen a varios motivos. Los microplásticos pueden bloquear el tracto digestivo de pequeños invertebrados. Además, la ingesta de los compuestos químicos incorporados a los plásticos durante su manufactura (como el bisfenol A, un disruptor endocrino) puede representar una amenaza para la salud. Por otra parte, los residuos plásticos que flotan en el mar actúan a modo de "esponja" frente a otros compuestos tóxicos (DDT, dioxinas o bifenilos policlorados, PCB), ya que los absorben en concentraciones entre cien y un millón de veces superiores a como lo hace el agua salada. Así, los seres vivos que ingieren microplásticos —y, por ende, sus predadores— se hallan expuestos a una alta concentración de toxinas. Numerosos expertos coinciden en que una solución consistiría en diseñar productos de plástico aptos para el reciclaje durante una gran parte de su vida.

Jennifer Ackerman

CARY WOLINSKY

UN ENGAÑO PARA LAS AVES
Las aves marinas engullen fragmentos de plástico, en especial si son rojos, ya que los confunden con alimentos. Se han hallado aves contaminadas con microplásticos en regiones remotas, como los priones antárticos o los págalos subantárticos.

COMO CANTOS RODADOS
Al igual que el mar convierte las rocas en arena, también desgasta y redondea los bordes de los objetos de plástico. Estos se transforman en fragmentos diminutos o incluso polvo, pero no desaparecen.

UNA VIDA CORTA
Se han identificado al menos nueve tipos de desperdicios plásticos en los mares, desde nailon y acrílico a poliéster, polipropileno (en cuerdas y recipientes), policarbonato (el plástico duro de las gafas) o poliestireno (en el *poliexpan* o "corcho blanco", entre otros). El poliestireno se fragmenta en piezas menores en menos de un año. Pero incluso plásticos duros, como el policarbonato, se descomponen en el mar y pueden liberar sustancias químicas en el proceso.

Formas de obtener grafeno

Avances en la producción de nanoláminas de carbono para uso en electrónica

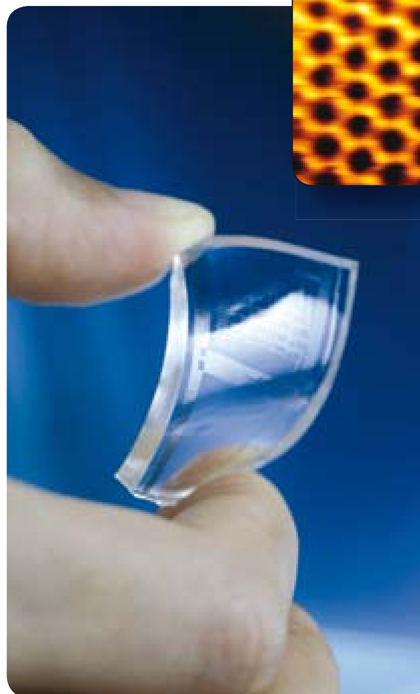
Aunque el silicio haya transformado el mundo digital, se siguen buscando sustancias aptas para construir circuitos integrados más pequeños, rápidos y económicos. El número uno de la lista lo ocupa el grafeno: finas láminas de átomos de carbono dispuestos en celdas hexagonales, que cuentan con el espesor de un solo un átomo. Este material exhibe una gama de propiedades valiosas (gran resistencia mecánica, transparencia —por su delgadez— y elevadísima conductividad electrónica) que lo hacen prometedor para pantallas flexibles o equipos electrónicos ultrarrápidos. El grafeno, que fue aislado hace sólo cinco años, se emplea ya en prototipos de transistores, memorias y otros dispositivos [*véase* "Grafeno", por A. K. Geim y P. Kim; Investigación y Ciencia, junio de 2008].

Sin embargo, para hacer viable su comercialización es preciso concebir procedimientos industriales que permitan fabricar láminas grandes y uniformes de grafeno monocapa y sin impurezas. Actualmente se investigan diversas vías, pero no resulta claro cuáles tendrán éxito. "Varios grupos afirman poder recubrir a bajo coste obleas de silicio con láminas de grafeno monocapa, pero hasta ahora no hemos visto ninguna demostración pública al respecto", dice James M. Tour, químico de la Universidad de Rice, en Texas.

Tal y como afirma su descubridor, Andre K. Geim, de la Universidad de Manchester, la producción de pequeñas cantidades de grafeno resulta sorprendentemente fácil. De hecho, se produce un poquito de grafeno cada vez que se arrastra la punta de un lápiz sobre un papel, pues el grafito de la mina del lápiz consiste, en realidad, en un apilamiento de capas de grafeno. El procedimiento inicial de obtención de grafeno era similar al de escribir con un lápiz: se raspaba una muestra de grafito y, con un microscopio, se examinaban los restos en busca de muestras idóneas o se separaban las escamas con una cinta adhesiva.

La mayoría de los científicos considera que tales técnicas de "exfoliación" mecánica sólo permiten preparar muestras de tamaño muy reducido. Pero Geim no está de acuerdo. Asegura que el procedimiento se ha ampliado para poder obtener tanto grafeno como se desee. Este investigador se vale de ultrasonidos para fragmentar el grafito en capas individuales que se dispersan en un líquido. Posteriormente, esta suspensión se deseca sobre una superficie. El resultado es una película de láminas diminutas y parcialmente superpuestas de cristales de grafeno. Sin embargo, no se sabe si estas láminas formadas por múltiples cristales serán aptas para muchas aplicaciones, ya que los efectos de borde en cada uno de los copos disminuyen la conductividad.

Por su parte, la exfoliación química podría quizá proporcionar muestras de mayor tamaño. En mayo de 2008, James P. Hamilton, de la Universidad de Wisconsin–Platteville, y Jonathan N. Coleman, del Trinity College de Dublín, demostraron la solubilidad del grafeno en ciertos disolventes orgánicos. Se introduce el grafito en un recipiente y se añade el disolvente orgánico. Una vez retirado el disolvente, la sustancia gris que aparece resulta ser grafeno puro. La empresa recién fundada por Hamilton, Graphene Solutions, confía poder convertir ese grafeno en láminas uniformes y monocristalinas, y comercializar el proceso.



UNA LAMINA DE GRAFENO (una monocapa de carbono estructurado en anillos hexagonales, *inserto*) estampada en un polímero permite crear un electrodo transparente.

Existen otras técnicas de exfoliación química. Rod Ruoff, ahora en la Universidad de Texas en Austin, y sus colaboradores de la Universidad Noroccidental, en Illinois, han demostrado que, si se añade ácido a una suspensión acuosa de grafito, se obtiene un óxido de grafito que posteriormente puede emplearse para obtener grafeno. Los copos de este óxido suspendido en líquido se depositan sobre un sustrato, donde forman una película. Al aumentar la temperatura, o al añadir otros compuestos, se elimina el oxígeno. El resultado es grafeno puro.

Uno de tales agentes reductores es el combustible para cohetes, según han descubierto científicos de la Universidad Rutgers. En concreto, vapores de hidracina, un compuesto tóxico sumamente reactivo. En 2008, Yang Yang y Richard B. Kaner, de la Universidad de California en Los Angeles, simplificaron el procedimiento de Rutgers mediante el uso de hidracina líquida. Después depositaron las piezas sobre obleas de silicio o sobre otros sustratos más flexibles. El resultado fueron películas monocapa integradas por numerosas laminillas. Estos dos científicos se afanan ahora en mejorar la calidad de las láminas y en la búsqueda de sustitutos menos peligrosos que la hidracina.

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y en otros centros se está intentando la formación de grafeno por deposición química de vapor (DQV), un proceso bien establecido que podría aplicarse fácilmente a la fabricación de microchips. En la DQV, compuestos químicos volátiles reaccionan y quedan depositados sobre un sustrato, formando un recubrimiento muy delgado. En el MIT emplean un sencillo horno tubular que contiene sustratos de ní-

CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE AUGSBURG (*grafeno*); CORTESIA DE JI HYE HONG PUBLICADO ONLINE EN NATURE; J14 DE ENERO DE 2009 (*manos con polímero*)

quel. Según explica Jing Kong, desde un extremo se hace fluir un hidrocarburo gaseoso que, al calentarse, se descompone. Los átomos de carbono se depositan sobre la superficie de níquel, la cual actúa a modo de catalizador y facilita la formación de las películas de grafeno. Sin embargo, la calidad del grafeno depende de si el sustrato de níquel se compone de muchos cristales o de sólo uno. Desafortunadamente, el níquel monocristalino (el que proporciona mejores resultados) es muy costoso.

El grafeno obtenido mediante DQV ha conducido a uno de los mayores éxitos hasta la fecha. Un grupo dirigido por Byung Hee Hong, de la Universidad Sungkyunkwan (Corea del Sur), ha obtenido películas de gran calidad que posteriormente ha estampado sobre un polímero transparente y deformable. El resultado: un electrodo transparente. Una versión perfeccionada del mismo podría reemplazar a los electrodos transparentes, más caros, empleados hoy día en pantallas (a base de óxido de titanio e indio).

Así pues, la carrera por la fabricación de grafeno podría tener más de un ganador. Coleman, del Trinity College, afirma que los métodos de exfoliación química (que por ahora producen grafeno de hasta varias decenas de micras) probablemente resulten ser los más idóneos para cantidades industriales de tamaño medio. Por el contrario, empresas de la talla de Intel estarían más interesadas en conseguir grandes superficies de grafeno mediante procesos de DQV (que hasta el momento han producido muestras de dos o tres centímetros cuadrados). En cualquier caso, ninguno de los métodos parece afrontar obstáculos insuperables. Según Tour, los problemas deberían quedar resueltos dentro de poco.

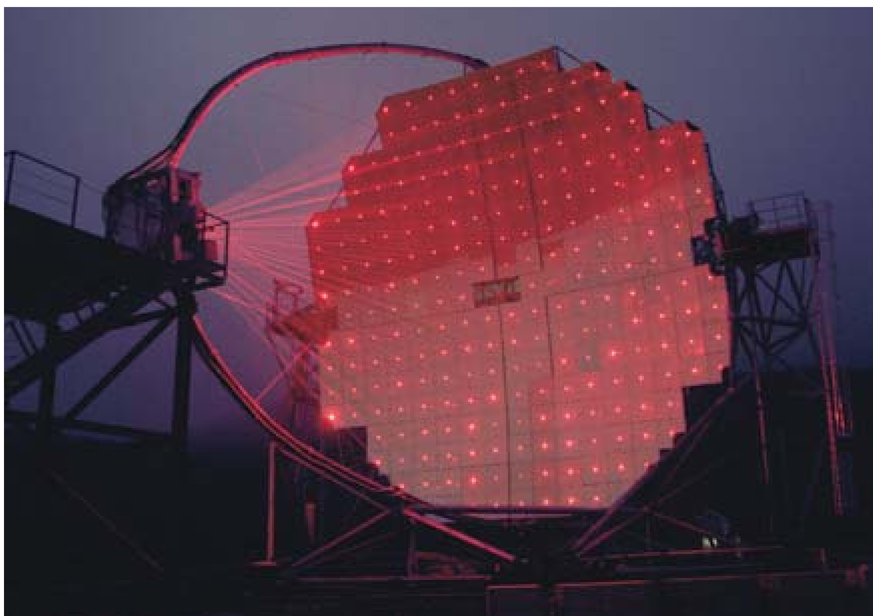
Steven Ashley

Telescopios MAGIC

Terabytes de datos para entender el universo violento

Miles de veces por segundo, los rayos cósmicos (partículas de altísima energía procedentes del espacio exterior) impactan contra los gases de la atmósfera terrestre. Tal y como describió hace unos sesenta años el físico Pierre Auger, en esas colisiones se desencadenan cascadas de partículas tan energéticas que su velocidad supera la velocidad de la luz en la atmósfera. (La velocidad de la luz en un medio diferente del vacío sí puede rebasarse.) Cuando ello ocurre, esas partículas dejan un rastro de radiación denominada radiación de Cherenkov, el análogo electromagnético de la onda de choque que se produce cuando un objeto rompe la barrera del sonido en un medio.

Desde hace ya más de un siglo, decenas de experimentos en todo el mundo intentan obtener información sobre el misterioso origen de los rayos cósmicos. Los que estudian las cascadas de partículas a partir de la mencionada radiación de Cherenkov se encuentran entre los más exitosos. Los escasos sucesos originados por rayos gamma (fotones de muy alta energía) son los que revisten mayor utilidad en astrofísica, ya que las partículas dotadas de carga eléctrica son desviadas por los campos magnéticos galácticos, por lo que, cuando llegan al detector, no resulta fácil extraer información sobre la fuente que las produjo. Por el contrario, los fotones son partículas neutras y no son desviados.



1. HACES DE LASER para enfocar los espejos del telescopio MAGIC.

ROBERT WAGNER, *Instituto de Física Max-Planck, Múnich (ambas fotografías)*

Una propiedad muy útil al respecto se basa en que la forma de una cascada de partículas desencadenada por rayos gamma difiere de la debida al ruido de fondo, generado mayoritariamente por protones. Para energías de entre 100 gigaelectronvolt y 100 teraelectronvolt, el fondo es más numeroso que la señal en una razón de 1:1000 o de 1:10.000. Sin embargo, el tipo de cascada que dejan ambos sucesos puede determinarse gracias a simulaciones numéricas, lo que permite discriminar entre ambos fenómenos y proceder a su análisis.

La atmósfera actúa de modo análogo al calorímetro de los detectores utilizados en los grandes colisionadores de partículas (como el Gran Colisionador de Hadrones —LHC— del CERN). En nuestro caso, actúan como detector los telescopios de rayos gamma MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope, “Gran telescopio Cherenkov de rayos gamma atmosféricos”): dos telescopios gemelos con sendos espejos de 17 metros de diá-

metro situados en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma. Sin embargo, los telescopios constituyen sólo la cara visible del experimento. Detrás queda una enorme cantidad de trabajo, desde el almacenamiento de una ingente cantidad de datos hasta la elaboración de información relevante para la comunidad científica.

Mediante técnicas de electrónica ultrarrápida, los telescopios MAGIC advierten decenas de miles de imágenes de las cascadas de partículas cada segundo, si bien sólo se registran las que coinciden en una ventana de unos pocos nanosegundos. Se requiere que haya coincidencia ya que, de esta manera, se elimina más ruido de fondo. Con todo, se registran unas 200 imágenes por segundo, cada una de las cuales requiere unos 130 kilobytes de datos. Aun teniendo en cuenta los períodos de mal tiempo y de luna llena en los que no se observa, se llegan a almacenar más de 100 terabytes de datos al año. Si bien estos números están lejos de los petabytes que se prevé que generen los experimentos del LHC, el acopio de datos y su tratamiento supone un serio desafío.

Todo ello se hace de forma centralizada en el Puerto de Información Científica (PIC), en el campus de la Universidad Autónoma de Barcelona. Allí, el Instituto de Física de Altas Energías, la Universidad Autónoma de Barcelona, el Instituto de Astrofísica de Andalucía y la Universidad Complutense de Madrid han llevado a cabo un gran esfuerzo para establecer el Centro de Datos MAGIC. El procesado y almacenamiento de datos utiliza una fracción de los recursos de unos de los 11 principales centros del mundo (los Tier 1) que participan en una red global de computación científica (*grid*) y posibilita el procesado en paralelo de decenas de programas de análisis. Ello resulta sumamente conveniente, ya que una única CPU tardaría más tiempo en procesar todos los datos que en adquirirlos, algo del todo inviable.



2. LOS DOS TELESCOPIOS MAGIC al amanecer. Sus imágenes estereoscópicas permiten una gran resolución.

Fenómenos observados

El telescopio MAGIC y otros experimentos similares abren una ventana que permite atisbar en los sucesos astronómicos más violentos y que más energía liberan. En nuestra galaxia, es posible contemplar los restos de antiguas estrellas que explotaron como supernovas o medir la precisión de los mejores relojes astronómicos, los púlsares (estrellas de neutrones que rotan a gran velocidad y emiten radiación electromagnética). Algo más lejos, en galaxias ajenas a la nuestra, destacan las observaciones de galaxias activas (las que exhiben una inusitada actividad en su núcleo, debida, según se cree, a la presencia de un agujero negro de gran masa en el centro de la galaxia), sin olvidar a los enigmáticos y breves estallidos de rayos gamma cósmicos.

En 2008 MAGIC logró detectar la emisión pulsada de rayos gamma más energética conocida hasta la fecha. En concreto, la del púlsar de la nebulosa del Cangrejo, una fuente que ha acaparado la atención de los astrofísicos de altas energías. No sólo fue un reto técnico detectar fotones a 25 GeV (energía baja para un telescopio terrestre de este tipo), sino que, además, el descubrimiento resultó de gran importancia para los modelos teóricos que describen el funcionamiento de estos objetos celestes, pues no se esperaba un umbral tan alto de energía en el espectro de emisión de un púlsar.

MAGIC también posee la mejor marca en lo que respecta a la lejanía de las fuentes de rayos gamma detectadas hasta ahora. También en 2008, detectó la emisión de 3C 279, un quásar (un tipo particular de galaxias activas, lejanas y muy luminosas) situado a cinco mil millones de años luz de la Tierra. El hallazgo acarrea consecuencias en lo que a nuestra comprensión del cosmos se refiere: el hecho de que rayos gamma originados a tamaña distancia logren llegar hasta nosotros implica que el universo es más transparente de lo que se creía.

La reciente puesta en funcionamiento del segundo telescopio, MAGIC II, permite explorar otros misterios, gracias, sobre todo, a las imágenes estereoscópicas, las cuales permiten obtener una nitidez extraordinaria. El primer descubrimiento relevante tras la incorporación de MAGIC II a las observaciones se realizó a principios de este año: una fuente que se cree asociada a la radiogalaxia IC 310, en el cúmulo de Perseo. Esta galaxia posee la particularidad de poseer un núcleo brillante y una cola más débil formada por *jets* relativistas (chorros de partículas que se mueven a velocidades próximas a la de la luz). Se trata de la primera de este tipo detectada a muy alta energía (por encima de los 300 gigaelectronvolt).

Y esto es sólo el principio. Junto con otros experimentos que observan desde las ondas de radio hasta los rayos X, conseguiremos un cuadro mucho más completo y detallado del universo en el que vivimos. Se trata sin duda de una obra que merece la pena contemplar.

Ignasi Reichardt
Instituto de Física de Altas Energías

Elsa de Cea
Instituto de Ciencias del Espacio
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña - CSIC

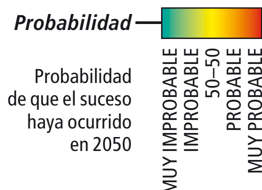
12 ACONTECIMIENTOS que cambiarían todo

Son varios los acontecimientos naturales o provocados por el hombre que podrían sobrevenir en cualquier momento y transformar completamente nuestras vidas. Muchos de ellos, sin embargo, no ocurrirán del modo en que esperamos

La ciencia transforma nuestra concepción del universo y del lugar que ocupamos en él. También nos ayuda a comprender los cambios que escapan a nuestro control y a enfrentarnos a ellos. La teoría de la relatividad, la selección natural, las teorías microbianas de la enfermedad, el heliocentrismo y otras explicaciones de los fenómenos naturales han dado una nueva forma a nuestro panorama intelectual y cultural. Lo mismo cabría decir de inventos como Internet, la lógica formal, la agricultura o la rueda.

¿Qué nuevos y dramáticos acontecimientos aguardan a la humanidad? A continuación contemplamos doce posibilidades y estimamos la probabilidad de que ocurran antes de 2050. Sin duda, algunas evocarán escenarios apocalípticos clásicos: una extinción global provocada por un asteroide, una guerra contra máquinas bélicas inteligentes o el mito de Frankenstein. No obstante, un análisis más cuidadoso sugiere que muchos de esos acontecimientos no se desarrollarán como creemos. Un mismo supuesto puede que resulte decepcionante o amedrentador para unos al tiempo que curioso o estimulante para otros. Pero algo es seguro: cualquiera de ellos cambiaría para siempre nuestras vidas y transformaría la noción que tenemos de nosotros mismos.

FOTOGRAFIAS DE KEVIN VAN AELST



Clonación de un humano


PROBABLE

El proceso entraña suma dificultad, pero parece inevitable

Charles Q. Choi

Desde el nacimiento de la oveja Dolly, en 1996, la clonación humana con finalidad reproductora se ha considerado un hecho inevitable. En varias ocasiones se han cantado éxitos más que dudosos, como el proclamado por una compañía patrocinada por una secta de adoradores de ovnis. Pero jamás se han creado clones humanos, a excepción, claro, de los gemelos idénticos nacidos de forma natural. A pesar de haberse conseguido en otros mamíferos, la clonación ha planteado muchos más obstáculos en el ser humano. Para algunos resulta tranquilizador. Para otros, decepcionante.

Para engendrar un clon de un mamífero se extrae el núcleo de un óvulo no fecundado y se reemplaza por el de una célula de un individuo de la misma especie. Este sistema se ha aplicado en óvulos humanos, pero no ha prosperado más allá de las primeras fases embrionarias, hasta la de mórula, una esfera compacta compuesta por algunas docenas de células. Al parecer, la transferencia del núcleo puede alterar la alineación correcta de los cromosomas en la mitosis. "Cada vez que se intenta la clonación en una nueva especie se requiere un proceso de aprendizaje; en el caso humano, un problema serio radica en la

➥ Versión multimedia del artículo original en: **http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=interactive-12-events**



obtención de una cantidad suficiente de óvulos de calidad para ir experimentando", opina Robert Lanza, de Advanced Cell Technology, de Worcester (Massachusetts), quien abrió titulares en 2001 por la primera clonación de embriones humanos. Uno de los pasos especialmente delicados consiste en determinar el instante exacto y la mezcla de reactivos correcta para reprogramar la célula.

Pero incluso en ensayos en los que ya se cuenta con cierta experiencia, alrededor del 25 por ciento de los animales clonados presentan anomalías. Lanza señala que pequeños errores durante la reprogramación, el cultivo o la manipulación de los embriones pueden provocar fallos en la gestación. Clonar a un humano "sería tan arriesgado como lanzar al espacio a un bebé dentro de un cohete con un 50 por ciento de probabilidades de estallar".

Y aunque la técnica ofreciese total garantía, los problemas éticos subsistirían. ¿Sería lícito clonar a un individuo sin su conocimiento y su autorización? Por otro lado, un clon podría vivir más plenamente, pues "tendría en su original un maestro perfecto", opina George M. Church, tecnólogo molecular de la Facultad de Medicina de Harvard. "Imaginemos que a los 25 años de edad me descubro en posesión de un excelente oído musical, pero no he aprendido música. Entonces podría decirle a mi clon que se pusiera a estudiarla a los cinco años de edad."

La posibilidad de clonación humana pudiera no estar restringida a *Homo sapiens*, pues acaso pueda obtenerse una secuencia genómica completa de un neandertal. Según Church, aunque el ADN se degrada en la fosilización, un individuo bien conservado podría suministrar suficientes moléculas para reconstruir todo su genoma. Pero llevar a término la clonación de individuos de una especie extinta ofrece aún mayor dificultad que la clonación normal, a causa de probables discrepancias en el ambiente uterino y el período de gestación. El único clon obtenido hasta la fecha de una especie desaparecida en 2000 (el bucardo, una variedad de cabra montesa) falleció inmediatamente después de nacer por deficiencias pulmonares.

En EE.UU., no todos los estados han prohibido la clonación humana con finalidad reproductora. En España está permitida desde junio de 2007, pero sólo con fines terapéuticos, no reproductores. Las Naciones Unidas han adoptado una prohibición no vinculante. "Si la clonación llega a producirse, será en algún país con legislación laxa, y probablemente la financiará algún individuo excéntrico de gran poder económico", conjetura Lanza. ¿Nos echaremos entonces atrás, horrorizados, o llegaremos a aceptar la clonación como hemos hecho con la fecundación *in vitro*? Sin duda, al tiempo que desarrollamos nuevas formas de creación de vida tendremos que reflexionar sobre las responsabilidades de ejercer tan enorme poder científico.

Dimensiones extra

50–50

El mayor colisionador de partículas del mundo podría descubrir nuevas dimensiones espaciales

George Musser

¿No sería fantástico liberarnos de las cadenas de la geometría ordinaria a través de una cuarta dimensión del espacio? Lograríamos desenrollar ovillos con suma facilidad, a un guante de la mano izquierda se le podría dar la vuelta para reemplazar a uno de la mano derecha, y los dentistas abrirían conductos radiculares sin que hiciese falta abrir la boca.

Por fantástico que pueda parecer, las dimensiones extra quizás existan realmente. Varios misterios del mundo que nos rodea (desde la poca intensidad de la fuerza de la gravedad hasta las profundas relaciones existentes entre las distintas fuerzas y partículas) parecen indicar que el universo conocido no es sino una mera sombra de una realidad de más dimensiones. De ser así, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, bien podría liberar la energía necesaria para romper las cadenas que retienen a las partículas en las tres dimensiones ordinarias.

Según el cosmólogo Max Tegmark, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, una demostración de que las dimensiones extra existen "transformaría radicalmente nuestra noción de la realidad". En 1990, a fin de ejemplificar el concepto, Tegmark diseñó una versión en cuatro dimensiones del popular videojuego Tetris, en la que el



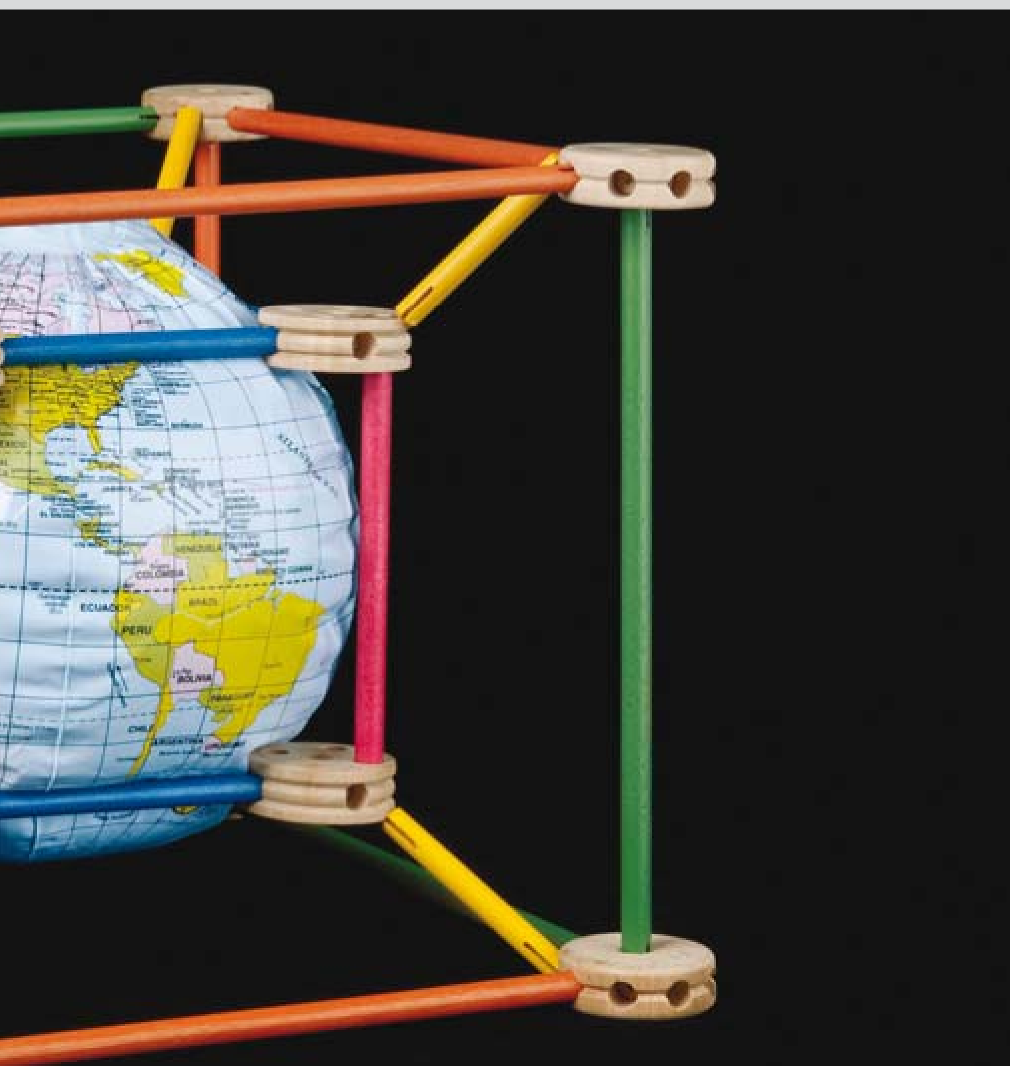
seguimiento de los bloques se efectuaba a partir de secciones tridimensionales de un espacio de cuatro dimensiones.

La principal justificación de las dimensiones extra proviene de la teoría de supercuerdas. Dicha teoría aspira a unificar todas las partículas e interacciones en un único modelo matemático; pero, para cumplir esa promesa, las supercuerdas requieren una curiosa condición: el espaciotiempo ha de contar con un total de diez dimensiones (nueve dimensiones espaciales más el tiempo). Así las cosas, la pregunta es obvia: ¿si realmente existen, por qué no vemos esas seis dimensiones "de más"? Hay dos respuestas posibles: o bien esas dimensiones adicionales son demasiado pequeñas como para introducirse en ellas; o bien, por nuestra propia naturaleza, nos encontraríamos "pegados" a una membrana tridimensional de la que nos es imposible escapar (algo así como una oruga a la que jamás le es dado abandonar su hoja).

En cualquier caso, no todos los modelos que aspiran a una teoría unificada implican dimensiones extra, por lo que tanto encontrarlas como descubrir que no existen supondría un dato de enorme utilidad. "Nos ayudaría a centrarnos en lo que estamos haciendo", asegura la física Lisa Randall, de la Universidad de Harvard, quien ganó su fama con un modelo que hacía viable la opción de la oruga y la hoja.

En caso de que fuesen demasiado pequeñas, una forma de llegar a esas dimensiones consistiría en aprovechar la energía de un acelerador de partículas. Según las leyes de la mecánica cuántica, cuanto mayor es la energía de una partícula, menor es la región del espacio que dicha partícula puede explorar. En el caso de una partícula subatómica, una energía de un teraelectronvolt (el orden de magnitud de las energías que se alcanzarán en el LHC) se corresponde con un tamaño de 10^{-19} metros. De modo que, si una dimensión extra es de un tamaño equiparable, la partícula caería en ella y comenzaría a vibrar en esa dimensión.

En 1998, el físico Gordon Kane, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, estudió la posibilidad de que una colisión de protones en el LHC produjese partículas cuya energía no sólo ascendiese al valor de 1 TeV, sino también a múltiplos enteros de dicha cantidad (2, 3, 4 TeV...). Esos múltiplos se corresponderían con los armónicos de las vibraciones de las partículas en las dimensiones adicionales. Ni las partículas conocidas ni otros procesos en los que interviniesen partículas exóticas (como las hipotéticas componentes de la materia oscura) podrían explicar tal espectro de masas.



Las dimensiones extra también podrían manifestarse de otras maneras. Si el LHC produjera agujeros negros subatómicos, ello apuntaría a la existencia de dimensiones extra, ya que la gravedad en el espacio ordinario de tres dimensiones es demasiado débil como para crear agujeros negros demasiado pequeños. Por razones geométricas, las dimensiones adicionales reforzarían la gravedad a distancias cortas. También cambiarían el comportamiento a pequeña escala de otras fuerzas, como el electromagnetismo. Además de en el LHC, existe la posibilidad de hallar indicios de dimensiones extra a partir de las mediciones de la intensidad de la fuerza gravitatoria o en observaciones cosmológicas, como en la dinámica de agujeros negros o en las explosiones de estrellas.

El descubrimiento transformaría no sólo la física, sino también las disciplinas afines. Las dimensiones extra podrían explicar misterios como el de la aceleración cósmica. Y quizá contribuyesen a las investigaciones que, actualmente, exploran la idea de que el espacio y el tiempo quizá no sean más que conceptos secundarios, emergentes de una realidad que, a un nivel fundamental, carece de ellos. En cualquier caso, cambiarían nuestra noción del espaciotiempo.

No todos piensan así. "Es cierto que las dimensiones extra representarían un descubrimiento fabuloso", afirma el físico Nima Arkani-Hamed, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. "Pero, desde un punto de vista conceptual, no son particularmente fundamentales."

Con independencia de lo atractiva que pueda resultar la existencia de dimensiones adicionales a las ya conocidas, lo que jamás lograremos será visitarlas por nuestros propios medios. Si las partículas que componen nuestros cuerpos tuviesen acceso a ellas, la libertad de movimiento añadida desestabilizaría las estructuras complejas y, con ellas, la vida. En el fondo, parece que la obligación de desenrollar ovillos o el dolor en la consulta del dentista son pequeñas compensaciones que nos permiten existir.

IMPROBABLE 

Inteligencia extraterrestre

¿Cómo responderíamos ante una señal del espacio exterior? *John Matson*

Hace cincuenta años, en lo que podríamos calificar como un arrebato de voyeurismo interestelar, un joven astrónomo decidió espiar a sus vecinos. En abril de 1960, en el Observatorio Nacional de Radioastronomía de Green Bank, en Virginia Occidental, Frank Drake apuntó un radiotelescopio de 26 metros de diámetro hacia dos estrellas cercanas con el objetivo de detectar las transmisiones de radio de posibles civilizaciones alienígenas. La búsqueda no dio frutos, pero con el Proyecto Ozma de Drake había nacido la búsqueda sistemática de inteligencia extraterrestre (SETI, por sus siglas en inglés). En la actualidad, esa búsqueda continúa.

Hoy Drake tiene 80 años y aún se dedica a ello. Dirige el Centro Carl Sagan para el Estudio de Vida en el Universo, del instituto sin ánimo de lucro SETI, en Mountain View (California). En lugar de emplear instrumentos ajenos, los expertos cuentan hoy con instrumentos propios, como la reciente Red de Telescopios Allen (ATA), en Hat Creek, California. Pero la financiación escasea (ATA se detuvo en 42 de los 350 dispositivos planeados inicialmente) y aún no existe una cantidad suficiente de datos que permita emitir juicios firmes sobre la existencia de vida extraterrestre inteligente.

"Aunque llevamos intentándolo cincuenta años, el tiempo real de observación ha sido mucho menor", comenta Jill Tarter, directora del Centro de Investigaciones del Instituto SETI. "Lo que sí podemos afirmar es que no en todos los sistemas estelares de la galaxia existen civilizaciones que estén emitiendo señales de radio."

Una opinión compartida por el astrofísico teórico Alan P. Boss, de la Institución Carnegie para la Ciencia: "Lo único que indica la ausencia de señales es que las civilizaciones que podrían haberlas enviado no son tan comunes como para que las búsquedas SETI hayan encontrado una. Pero aún nos queda por explorar gran parte de la galaxia". Una de las campañas más exhaustivas hasta el momento, el Proyecto Phoenix, ha observado en un amplio espectro de frecuencias con uno de los mayores radiotelescopios del mundo. En nueve años, Phoenix ha sondeado unas 800 estrellas cercanas, menos de la millonésima parte del uno por ciento de la Vía Láctea.

Pero, aun en el caso de las estrellas ya exploradas, resulta abrumadora la cantidad de parámetros que hay que afinar para confirmar una señal alienígena. Al igual que en la radio terrestre, ha de tenerse en cuenta la frecuencia (¿de qué emisora se trata?), la hora de emisión (¿se interrumpe la programación?) o el tipo de modulación (¿AM o FM?), entre otros. Como mínimo, la búsqueda requiere jugar con nueve parámetros. Y aunque supiéramos qué tenemos que detectar y contásemos con un instrumento infalible para ocho de esos parámetros, la señal aún se nos podría escapar si nos faltara el control sobre uno de ellos.

La posibilidad de una vida extraterrestre en general, e inteligente en particular, se ha visto reforzada con la confirmación de que los sistemas planetarios alrededor de otras estrellas son muy comunes. La mayoría de los más de 400 exoplanetas descubiertos hasta la fecha han resultado ser gigantes ardientes e inhóspitos para la vida tal y como la conocemos. No obstante, el telescopio espacial Kepler, de la NASA, se halla explorando la población planetaria de más de 100.000 estrellas. En los próximos años debería quedar zanjada la cuestión acerca de cuán exóticos son los planetas similares a la Tierra.

Pero, incluso en mundos similares al nuestro, puede que una civilización que transmita señales de radio no sea tan común. Numerosos expertos albergan más esperanzas de encontrar formas de vida simples, como microorganismos u hongos. Boss asegura que tales formas de vida deberían abundar, pero que, hasta dentro de al menos veinte años, no dispondremos de la tecnología necesaria para detectarlas.

En cualquier caso, ¿qué sucedería si algún día recibimos la señal de una civilización extraterrestre? La comunidad SETI cuenta con protocolos al respecto, tales como alertar a observatorios de todo el mundo a fin de verificar una posible señal, pero no puede decirse lo mismo de nuestros gobiernos. No existe ningún marco de las Naciones Unidas que establezca las directrices ante una situación así. Si oyésemos el grito de un vecino potencialmente hostil, ¿nos atreveríamos a responder?

Para Drake, ello no supondría una experiencia completamente nueva. En su época de estudiante creyó haber efectuado una detección. "Sientes una emoción especial cuando crees que ha ocurrido, porque sabes que todo va a cambiar."

IMPROBABLE 

Conflicto nuclear

Guerra local, pesadilla global *Philip Yam*

El final de la guerra fría y las actuales restricciones armamentísticas por parte de EE.UU., Rusia y otras potencias han reducido sobremanera la amenaza de una aniquilación nuclear global. Sin embargo, las interminables tensiones que agitan otras regiones del planeta mantienen vivo el miedo a un conflicto nuclear.

Una sola detonación basta para provocar una horrible matanza. La explosión en Hiroshima (equivalente a unas 15.000 toneladas de TNT) generó vientos supersónicos que redujeron a escombros edificios de hormigón sitos en las inmediaciones del impacto. El calor emitido abrasó hasta la muerte a todo aquel que se hallaba en el radio de un kilómetro; en varios kilómetros a la redonda, la población sucumbió al envenenamiento radioactivo y al cáncer.

Efectos de alcance mundial no llegarían a producirse salvo que explosionasen docenas de bombas. Sin embargo, algo así podría ocurrir en un conflicto entre Pakistán e India. Recientemente se han modelizado los efectos de un hipotético enfrentamiento en el que dichos países descargasen sus arsenales, integrados por unas 100 bombas similares a la de Hiroshima [*véase* "Repercusión planetaria de una guerra nuclear regional", por Alan Robock y Owen Brian Toon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2010].

Además de los 20 millones de bajas directas que ello supondría, un gran número de personas ajenas al conflicto perecería a raíz de las secuelas. Las explosiones proyectarían unos cinco millones de toneladas de cenizas hacia las capas altas de la atmósfera. Al ser desplazadas por las corrientes climáticas, esas partículas rodearían el globo en una semana y, en el plazo de dos meses, cubrirían completamente el planeta. La escasez de luz solar afectaría a la vegetación y a toda la cadena trófica durante unos diez años. La hambruna resultante acabaría con la vida de los mil millones de personas que hoy en día sobreviven con unos recursos alimentarios mínimos.

Las perspectivas son nefastas. Aunque cabe un destello de esperanza: depende de nuestra capacidad —y responsabilidad— evitar una catástrofe de semejante magnitud.

IMPROBABLE 

Impacto de un asteroide

Una extinción global es poco probable, pero una explosión aérea podría arrasar una ciudad

Robin Lloyd

El pasado 13 de junio, un asteroide denominado 2007 XB10 (con un diámetro de 1,1 kilómetros y el potencial de provocar un desastre a escala planetaria) se aproximó a la Tierra. Para ser uno de los objetos considerados "próximos", este asteroide pasó, por fortuna, bastante lejos: a unos 10,6 millones de kilómetros (27,6 veces la distancia a la Luna). De hecho, no parece haber ningún asteroide gigante destinado a reescribir en un futuro próximo nuestra historia. La mala noticia es que dentro de los próximos 200 años sí se espera que alguna roca espacial de menor tamaño estalle en la atmósfera con la fuerza suficiente para devastar una ciudad pequeña.

Un objeto próximo a la Tierra (NEO por sus siglas en inglés) se define como un asteroide o cometa que pase a menos de 195 millones de kilómetros del planeta. En 2009, la NASA refirió 90 de tales objetos a menos de 5 distancias lunares y 21 a una distancia lunar o menos. Los NEO suelen mostrarse como pequeñas manchas en las imágenes. Registros tan fugaces dificultan en gran medida el cálculo de su órbita, por lo que, hasta la obtención de una mayor cantidad de datos, sólo pueden hacerse apreciaciones probabilísticas sobre la posibilidad de un impacto. La NASA ha localizado 940 NEO de más de un kilómetro de diámetro (un 85 por ciento del total de objetos estimados con ese tamaño) y, según sus cálculos, ninguno de ellos chocará contra la Tierra. El NEO que acabó con los dinosaurios contaba con unos 10 kilómetros de diámetro.

Según un informe del Consejo Nacional de Investigación estadounidense (NRC) publicado este año, la mayor amenaza proviene de rocas menores. Estos asteroides y cometas (unos 100.000, con diámetros de 140 metros o más) resultan demasiado pequeños para provocar una extinción masiva. Pero, en caso de impacto, incluso el menor de ellos liberaría una energía de unos 300 megatones. Tales sucesos ocurren con mayor frecuencia (para objetos de 140 metros, uno cada 30.000 años) que los impactos de cuerpos de un kilómetro (uno cada 700.000 años).

En 2005, la NASA inició un sondeo celeste cuya meta era tener localizados el 90 por ciento de tales objetos para 2020. Pero los recortes presupuestarios impedirán que la agencia espacial cumpla con esa fecha límite. Cada año se destinan unos 4 millones de dólares a la búsqueda de NEO.

De cualquier manera, una situación de riesgo podría venir provocada por un cuerpo aún menor. El suceso más probable es el impacto de un NEO de entre 30 y 50 metros de diámetro. Al llegar a la Tierra, estallaría en la atmósfera y la energía liberada bastaría para arrasar una ciudad. El más famoso de estos fenómenos, la explosión aérea en 1908 sobre Tunguska, en Siberia, arrasó una región del tamaño de Londres. El conocido cráter meteorítico de Winslow, en Arizona, también fue provocado por un objeto de entre 30 y 50 metros.

El mayor banco de datos de explosiones aéreas se conserva en los departamentos de Defensa y Energía de EE.UU. y en las estaciones de seguimiento del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares. El informe del NRC, en el que se solicita un mayor uso compartido de estos datos tan celosamente guardados, estima que las explosiones aéreas de NEO de 25 metros ocurren cada 200 años. La mayoría explotan sobre los océanos, donde, si bien el peligro directo para la vida es menor, podrían desencadenar un tsunami. Mark Boslough, de los Laboratorios Nacionales Sandia, afirma que las explosiones de cuerpos de 4 metros ocurren todos los años.

¿Qué haríamos en caso de descubrir un NEO que apunta directamente hacia nosotros? Los protocolos de respuesta se encuentran aún en sus inicios, afirma Michael F. A'Hearn, del NRC y la Universidad de Maryland. En el caso de un objeto detectado con una antelación de años o décadas, la idea más razonable sería lanzar una o más naves espaciales de gran tamaño contra el objeto y desviar así su trayectoria. Contra un NEO de más de 500 metros y de cuya existencia no supiésemos hasta meses o años antes, una explosión nuclear sería la única opción viable.

En el caso de un objeto con la capacidad de destruir una ciudad y con muy poco tiempo de aviso, las opciones son muy limitadas. Quizá la única practicable fuese la evacuación.

Pandemias mortíferas

 50–50

Los virus gripales pueden cobrarse millones de vidas y provocar un desastre económico

Katherine Harmon

El impacto pandémico del virus H1N1 ha sido menor de lo temido, pero ha puesto al descubierto las carencias de nuestras medidas preventivas si hubiéramos de hacer frente a un patógeno más letal. A pesar de los enormes progresos de la medicina desde la gripe de 1918, una enfermedad nueva y sumamente contagiosa podría todavía devastar poblaciones y desbaratar estructuras sociales, económicas y políticas y garantías legales por todo el planeta.

Una cepa vírica nueva y agresiva —sea de gripe o de otro mal— provocaría millones de víctimas, incluso entre individuos en la flor de la edad, advierte Lawrence O. Gostin, profesor de legislación sanitaria global en la Universidad de Georgetown. Muchos países cerrarían sus fronteras, acción que iría acompañada de actos discriminatorios contra individuos o grupos sociales y de recriminaciones entre los gobiernos. El comercio y los intercambios internacionales se desplomarían, con "tremendas consecuencias financieras", prosigue Gostin, que estima un descenso de entre un 3 y 5 por ciento en el PGB mundial (entre 1,5 y 2,5 billones de euros). Ese ciclo de inestabilidad y contagio duraría varios años, al ir llegando sucesivas oleadas de la enfermedad con los cambios de estación.

Cuando se acerca una amenaza vírica, los responsables políticos deben tomar decisiones muy rigurosas a partir de información imperfecta e incompleta. Los derechos humanos fundamentales sufrirían graves limitaciones, o serían vulnerados, al intentar los gobiernos impedir la difusión del mal. Si además el flagelo contagioso procediera de malhechores, la revuelta social podría agravarse. "Si la epidemia fuese obra humana, las cifras de morbilidad y mortalidad quizá no ascenderían tanto", señala Gostin. "Pero la población temería lo peor y se originaría una enorme ruptura social y económica, mayor que la causada por un desastre natural."

MUY PROBABLE 

Creación de vida

¿Podrá la biología sintética dar vida a la materia inanimada? *David Biello*

Un científico vierte unos cuantos compuestos químicos en una probeta burbujeante. La agita un poco. Se producen sutiles reacciones, y ¡zas!, un nuevo ser vivo se ensambla por sí solo, listo para salir al mundo y medrar. Tal parece ser la concepción popular sobre la biología sintética, es decir, sobre la creación de vida en el laboratorio.

Pero la investigación en este campo no se interesa demasiado por animar lo inanimado. De hecho, se está lejos de comprender qué procesos básicos permitirían el ensamblaje de compuestos inertes y no dirigidos para formar células vivas con la capacidad de reproducirse. El famoso experimento de Miller-Urey, en 1952, que creó aminoácidos a partir de lodo primordial, sigue resultando difícil de reproducir de modo concluyente.

La biología sintética de nuestros días estudia la modificación de organismos vivos. Podría considerarse como una forma de ingeniería genética "con anabolizantes": en lugar de reemplazar un gen, se modifican grandes bloques de genes, e incluso genomas completos. La alteración del ADN lleva a los organismos a sintetizar determinados compuestos, combustibles y medicinas. "Se construye desde cero el conjunto de instrucciones que rigen la vida para incorporarlo a un ser vivo, sustituyendo en éste su sistema de instrucciones natural", explica Drew Endy, bioingeniera de la Universidad de Stanford. "Ese proceder define una segunda vía para promulgar vida en la Tierra. Ya no es imprescindible descender directamente de un progenitor".

A este respecto, algunos científicos no encuentran justificado reproducir una célula existente a partir de otra creada por el hombre. "No vale la pena crear una célula cuyo parecido con otra que ya existe es tan fuerte. Podríamos perfectamente servirnos de la célula original", razona George M. Church, genetista de la Escuela de Medicina de Harvard. Y la manipulación de genomas se ha difundido tanto, que ya la practican hasta los estudiantes de secundaria.

La biología sintética, de hecho, se propone aplicar a la biología los principios de la ingeniería a gran escala. Imaginemos un mundo en el que se programa un bambú para que crezca con la forma de un asiento y ya no sea necesario tejerlo burdamente por medios mecánicos o manuales. Un mundo en el que existan sistemas de paneles solares autoensamblados (a saber, las hojas de las plantas) que suministren electricidad a las viviendas. O árboles que exuden gasóleo por el tallo. O sistemas biológicos modificados que eliminen la contaminación o puedan medrar en un clima cambiante. Las bacterias reprogramadas podrían incluso invadir nuestro organismo con fines curativos, y actuar como un ejército de médicos residentes en nuestro cuerpo.

"En principio, todo cuanto se fabrica podría obtenerse también por medios biológicos", argumenta Church. De hecho, ya existen aplicaciones de ese proceso a pequeña escala: las enzimas producidas por microorganismos que soportan temperaturas elevadas, utilizadas en lavandería, han sido modificadas para que operen en agua fría, con el consiguiente ahorro de energía.

"Durante los 100 años venideros, la biología sintética va a introducir cambios fundamentales en nuestra manera de fabricar las cosas", pronostica David Rejeski, director del programa de ciencia, tecnología e innovación del Centro Internacional Woodrow Wilson, en Washington D.C. "Mediante bioingeniería podemos manipular la materia a una escala biológicamente relevante. El cambio va a ser tan grande como el de la revolución industrial del siglo XIX."

Pero las grandes promesas conllevan grandes riesgos, en concreto, la contaminación desde el laboratorio de microorganismos modificados. En la actualidad, la mayoría de tales creaciones no logra sobrevivir por sus propios medios. Pensando en creaciones futuras más refinadas, los biólogos apuntan que será preciso instituir diversas salvaguardias, como una supervisión estricta o la introducción en el nuevo código genético de una secuencia de autodestrucción. Dado que es posible rehacer organismos completos a nivel genético, los científicos pueden aislarlos de los sistemas naturales. Endy afirma: "Podemos hacer que fallen enseguida".

No obstante, algunos científicos sí están intentando re-crear vida. Carole Lartigue, Hamilton Smith y otros, del Instituto J. Craig Venter, han generado un genoma bacteriano partiendo de cero. Incluso han convertido un tipo de microorganismo en otro distinto. En otros lugares se han creado orgánulos sintéticos, y un orgánulo enteramente nuevo, el sintosoma, para producir enzimas utilizadas en biología sintética. La formación de vida a partir de materia inanimada puede ser inminente.



Tal hazaña no significaría que se llegue a comprender el origen de la vida, pero sí podría despertar el temor de haber alcanzado un poder que el hombre desmerece, propio de la divinidad. Por otra parte, puede que la creación de vida suponga una cura de humildad que nos haga ver de otro modo a los demás seres vivos, nuestros prójimos. "Podríamos reconstruir nuestra civilización, asociados con la vida a nivel molecular, para producir de forma sostenible los materiales, la energía y los alimentos que necesitamos", explica Endy. "Lograríamos así una relación equilibrada con los otros seres vivos del planeta, basada en principios muy diferentes de los que ahora aplicamos."

Superconductividad a temperatura ambiente



En caso de existir, transformaría por completo la red eléctrica *Michael Moyer*

Una central térmica puede levantarse en casi cualquier lugar. Las energías renovables, en cambio, son algo más exigentes. Los vientos más fuertes y regulares soplan en los altiplanos y el Sol brilla con máxima intensidad en los desiertos. El transporte de toda esa energía hasta poblaciones situadas a cientos de kilómetros será uno de los grandes obstáculos a los que se enfrentará la transición a las energías renovables.

Los mejores cables superconductores disponibles a día de hoy lograrían canalizar toda esa electricidad con unas pérdidas mínimas. No obstante, existe un problema: su funcionamiento exige mantenerlos en un baño de nitrógeno líquido a 77 kelvin (–196 grados Celsius). Un tendido de tales características requeriría unidades de refrigeración cada kilómetro, lo que multiplicaría el coste, la complejidad y la vulnerabilidad de los proyectos basados en cables superconductores.

Superconductores que funcionasen a temperatura y presión ambientes harían posible una auténtica red de suministro eléctrico a escala planetaria. El Sol del Sahara abastecería a Europa Occidental a través de cables tendidos en el lecho del Mediterráneo. Pero la receta para fabricar superconductores a temperatura ambiente continúa encerrando hoy el mismo misterio que en 1986, cuando se obtuvieron los primeros superconductores que lograban operar a la temperatura "alta" del nitrógeno líquido. (Con anterioridad a esa fecha sólo se conocían superconductores a temperaturas de 23 kelvin o inferiores.)

El descubrimiento, hace dos años, de cierta clase totalmente nueva de superconductores (pnicturos de hierro) alentó las esperanzas de entender la teoría que se esconde tras el mecanismo que permite la superconductividad a altas temperaturas [*véase* "Claves de la superconductividad a altas temperaturas", por Graham P. Collins y "Pnicturos de hierro", por Ibério P. R. Moreira y Francesc Illas; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2009]. Tales conocimientos quizá permitiesen avanzar hacia la consecución de semiconductores a temperatura ambiente. Hasta ahora, sin embargo, el progreso ha sido lento. Los cambios no siempre llegan cuando uno quiere.

PROBABLE 

Máquinas conscientes

¿Qué ocurriría si los robots empezasen a tomar decisiones por sí solos?

Larry Greenemeier

Los expertos en inteligencia artificial no dudan que el desarrollo de computadoras y robots sumamente inteligentes, con capacidad para reproducirse, aprender y adaptarse a diferentes circunstancias por sí solos cambiará el mundo. Cuándo ocurrirá, cuál será la magnitud del fenómeno y qué habremos de hacer al respecto constituyen, no obstante, objeto de debate.

Las máquinas inteligentes con que contamos hoy día se hallan, en su gran mayoría, diseñadas para realizar tareas específicas bajo condiciones conocidas. Pero las máquinas del futuro gozarán de mayor independencia. "Cuanto más complejas sean las clases de tareas que pretendamos encomendar a las máquinas, mayor será la autonomía que habremos de requerir de ellas", sostiene Hod Lipson, ingeniero de mecánica e informática de la Universidad Cornell. A medida que los problemas se tornen más difíciles de prever, las máquinas habrán de contar con una mayor capacidad de adaptación y decisión propias. Y conforme vaya perfeccionándose su habilidad para el aprendizaje, añade, "supongo que comenzarán a adquirir consciencia del entorno y de sí mismas".

Si bien los neurocientíficos debaten sobre los fundamentos biológicos de la consciencia, la emergencia de sistemas complejos parece ser una pieza clave. Eso lleva a pensar que ordenadores dotados de materiales y soportes lógicos muy avanzados y versátiles podrían, algún día, llegar adquirir consciencia de sí mismos. Si películas como *Terminator* están en lo cierto, una de las formas que tendremos de saber si las máquinas han alcanzado tal nivel de cognición será que súbitamente nos declararán la guerra. Lo más probable, piensan los expertos, es que lo veamos venir.

Semejante presunción nace del propio comportamiento humano. Somos únicos porque nuestra inteligencia nos faculta para perseguir una y otra vez metas mayores, opina Selmer Bringsjord, lógico y filósofo del Instituto Politécnico Rensselaer. Mientras que los animales parecen hallarse encerrados en una "eterna prisión cognitiva", las personas poseemos la facultad de superar los límites de nuestro conocimiento.

Si una máquina alcanzase a comprender su propia existencia y constitución, se encontraría capacitada para perfeccionarse a sí misma. "Será una pendiente muy resbaladiza", afirma Will Wright, creador de la serie de juegos de simulación The Sims y cofundador del club de robótica de Berkeley "Stupid Fun Club". Así, en cuanto una máquina adquiera consciencia propia, el paso siguiente será mejorarse a sí misma. "Será una indicación crítica de que las cosas se ponen interesantes", añade Wright. Los perfeccionamientos tendrían lugar de generación en generación, lo que, en el caso de una máquina, podría reducirse a cuestión de horas.

En otras palabras, la adquisición de consciencia otorgaría a las máquinas la facultad de reproducirse por sí solas y, con ello, la posibilidad de crear máquinas mejores sin necesidad de la intervención humana. Wright afirma que, en lo referente al destino de la humanidad, ese supuesto siempre le ha aterrado más que cualquier otro. "Quizá vivamos lo suficiente como para llegar a ver tal cosa. Y una vez que nos encontremos compartiendo el planeta con alguna forma de

superinteligencia será imposible saber a qué atenernos.”

No todos se muestran tan pesimistas. Bringsjord afirma que, después de todo, las máquinas siguen la lógica de su programación, y si ésta se efectúa de manera adecuada, “la máquina no va adquirir poderes sobrenaturales”. Sin embargo, señala, un motivo de preocupación lo representaría la implementación, sin supervisión posterior, de inteligencia artificial reforzada en armas o máquinas bélicas. Salvo en ese caso, Bringsjord considera que un uso responsable de la inteligencia artificial permitirá controlar el futuro.

La aparición de una inteligencia artificial autoconsciente no llegará “como una invasión de máquinas extraterrestres decididas a reemplazarnos”, concede el escritor y futurista Ray Kurzweil. Las máquinas, vaticina, evolucionarán de manera análoga a como lo hemos hecho los humanos. Pero, en última instancia, máquinas conscientes y capacitadas para perfeccionarse a sí mismas evolucionarían hasta situarse más allá de nuestra capacidad para controlarlas. “Y puede que hasta para entenderlas”, concluye.

No quedan claros los aspectos jurídicos que plantearía la existencia de máquinas que escapasen al control humano. Al respecto, Lipson opina que “sería una buena idea ir pensando en tales cosas”. Reglas éticas como “las tres leyes de la robótica” que enunciara Isaac Asimov (en esencia, prohiben a un robot lesionar a un humano o permitir que un humano sufra daño) se volverán de difícil cumplimiento en cuanto los robots comiencen a programarse unos a otros y a prescindir de la aportación humana. Las leyes de Asimov, afirma Lipson, asumen que la programación de los robots corre a nuestro cargo. Y eso no tendría por qué ser así.

No obstante, hay quien se pregunta si los humanos podemos arrogarnos el derecho de gobernar a una nueva raza de inteligencia artificial. “¿Quién puede afirmar que ése no es el curso natural de la evolución?”, pregunta Wright. “¿Acaso los dinosaurios deberían haber legislado el derecho de los mamíferos a superarles y hacerse con el control del planeta?” Si tal control resultase imposible, confiemos al menos en la posibilidad de compartir pacíficamente el futuro con nuestros compañeros de silicio.



Fusión de los casquetes polares



PROBABLE

El ascenso del nivel del mar está modificando los contornos litorales *David Biello*

Estados Unidos se está encogiendo, en sentido estricto. A lo largo del siglo XX ha perdido casi 20 metros de playa en la costa este. El nivel de sus mares se ha elevado alrededor de 17 centímetros desde 1900, debido a la dilatación del agua (al aumentar de temperatura, desciende su densidad) y a la progresiva fusión del hielo polar.

Pero esa elevación no es más que una mínima muestra de lo que está por venir. “Hay que prever que el ascenso alcanzará un metro hacia finales del presente siglo”, advierte el glaciólogo Robert Bindschadler, científico emérito de la NASA. “El calor oceánico está destruyendo la capa de hielo.”

Algunos de los más temidos pronósticos —Florida sumergida bajo cinco metros de agua o la formación de un enorme golfo donde ahora se halla Bangladesh— pueden tardar siglos en cumplirse. Pero hacia 2100 cabe esperar un Artico sin hielo y unos contornos litorales diferentes. Según el cálculo del economista Nicholas Stern, de la Escuela de Economía de Londres, unos 200 millones de personas viven en la actualidad a menos de un metro sobre el actual nivel del mar. Lo mismo se puede decir de ocho de las diez mayores ciudades del mundo y de la mayoría de las megaciudades de los países en desarrollo. “Me temo que tendrán que mudarse”, pronostica Bindschadler.

De hecho, a menos que se reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, el nivel de los mares seguirá subiendo, conforme se vayan fundiendo las capas gélidas que cubren las cimas de las cordilleras (alrededor del 1 por ciento de los hielos del planeta), Groenlandia (9 por ciento) y la Antártida (90 por ciento). En conjunto, alojan agua suficiente para elevar como mínimo 65 metros el nivel del mar.

Hacen falta siglos para fundir toda una capa de hielo, pero aun así, los hielos están desapareciendo más rápidamente de lo esperado por los científicos hace tan sólo pocos años. Incluso con un ascenso gradual del nivel del mar, el riesgo de tormentas catastróficas y otros fenómenos similares va aumentando de forma subrepticia.

Otro fenómeno sorprendente es el derivado de la atracción gravitatoria ejercida por el hielo en el agua circundante. En términos generales, si se fundiera el hielo de Groenlandia, “casi todo el ascenso del nivel del mar se produciría en el hemisferio sur”, al revés de lo que sucedería si se fundieran los hielos antárticos, explica el físico W. Richard Peltier, de la Universidad de Toronto. “La región con mayor riesgo de desestabilización por el calentamiento global es la Antártida occidental.”

Incluso aunque se frenen y disminuyan las emisiones de gases de efecto invernadero, resultará difícil evitar la fusión del hielo en los polos, porque las capas de hielo experimentan con demora los efectos del cambio climático y, una vez fundidas, tardan tiempo en volverse a formar. Todavía no se sabe cómo se adaptarán los humanos a un mundo más inundado. Pero la tendencia actual, señala Bindschadler, “no tiene escapatoria”.

Terremotos en el Pacífico

¿Llegará el temido “gran terremoto” a fracturar California?

Katherine Harmon

Puede que Los Angeles no se convierta en una isla, cuando el temido “gran terremoto” haga temblar California. Pero cualquier acontecimiento sísmico importante en la falla de San Andrés acercaría varios metros Los Angeles a San Francisco. Los científicos, y la población en general, llevan largo tiempo temiendo que un gran terremoto sacuda las costas occidentales de Estados Unidos. El Servicio Geológico de ese país (USGS) estima una probabilidad del 99 por ciento de que California sufra, antes de 2038, un terremoto de una magnitud de al menos 6,7.

Pero esa magnitud podría superarse con creces. Según Lucy Jones, investigadora principal del proyecto de demostración de riesgos múltiples del USGS del sur de California, si gran parte de la falla de San Andrés se fracturase en una sola vez, el terremoto alcanzaría los 8,2 grados de la escala de Richter.

La falla de San Andrés abarca unos 1300 kilómetros, desde el sur de California hasta más allá del Area de la Bahía de San Francisco. Corresponde al deslinde entre la placa continental norteamericana, que se desplaza hacia el sureste, y la placa del Pacífico, que se encamina hacia el noroeste. Según estimaciones basadas en registros geológicos, la falla se fractura una vez cada 150 años, por término medio. Pero el último desplazamiento importante aconteció hace unos 300 años.

Un terremoto de magnitud 7,8 (que un informe conjunto del USGS y de la Sociedad Geológica de California califica como “probable”) sacudiría a unos 10 millones de habitantes del sur de California y provocaría unas 1800 víctimas mortales y unos 50.000 heridos. Un seísmo de tal magnitud, según modelos del USGS, entrañaría desplazamientos de unos 13 metros en la falla. Tal fractura tajaría las carre-

teras, oleoductos y acueductos, ferrocarriles y cables de comunicaciones que cruzan la falla, y provocaría un sinfín de corrimientos de tierras. El terremoto causaría daños directos estimados en unos 150.000 a 200.000 millones de euros, y las perturbaciones y destrozos en infraestructuras y en la actividad económica supondrían varios miles de millones más.

Pero la falla de San Andrés no es la única que probablemente se desplace. La actividad sísmica a lo largo de una falla puede ser desencadenada por otras que estén a punto de iniciarla, aunque éstas se hallen a miles de kilómetros de distancia de la primera. Un terremoto de magnitud 6,5 que sacudió el norte de California el pasado enero se produjo en la parte sur de la zona de subducción de Cascadia, que transcurre paralela frente a la costa noroeste del Pacífico. El límite de esa placa podría desencadenar un seísmo de una magnitud de al menos 9,0 (como el de Sumatra en 2004, causante de un tsunami devastador). Los registros geológicos dan pruebas de un terremoto en 1700, que provocó un tsunami que llegó hasta Japón; la probabilidad de que se produzca otro en los próximos decenios se estima en uno sobre diez.

La predicción de terremotos puede compararse con el pronóstico meteorológico para la próxima semana a partir del conocimiento del clima local, explica Robert Yeats, geofísico de la Universidad estatal de Oregón. Si uno sabe que no tardará en producirse un terremoto, difícilmente cambiará su plan de vacaciones, pero sí deberá modificar sus normas de edificación". Los edificios más grandes serán, sin duda, los más seguros; algunos de los rascacielos del estado se han construido para soportar magnitudes superiores a 7,8. Y el mero hecho de que el "gran terremoto" se retrase, no implica que el próximo movimiento sísmico dé lugar al peor de los supuestos posibles. Todavía se está investigando la frecuencia de los grandes seísmos (de magnitud superior a 6,0) en el registro geológico, y algunos datos nuevos apuntan a que, en la falla de San Andrés, los seísmos de menor magnitud se convertirían en un acontecimiento cada vez más habitual.

Pero si se produjera un gran terremoto, podría no resultar tan devastador como se teme, gracias a una edificación más acorde y a las campañas de prevención. En cambio, los seísmos en las zonas más pobres y menos preparadas, aunque de magnitud moderada, provocan grandes estragos. El terremoto del pasado enero en Haití costó casi un cuarto de millón de vidas, estremecedor ejemplo de cuán súbitamente el corrimiento de una falla puede reducir a escombros ciudades que no han podido permitirse el lujo de una planificación cuidadosa.

Energía de fusión

MUY IMPROBABLE

Resolvería numerosos rompecabezas ecológicos, pero sigue resultando difícil de lograr *Michael Moyer*

Según un viejo chiste, un reactor de fusión operativo siempre estará listo dentro de unos veinte años. Sin embargo, hoy en día tal pronóstico suena demasiado optimista. El mayor proyecto mundial de investigación en fusión de plasma, el reactor ITER, en el sur de Francia, no comenzará a realizar experimentos antes de 2026. Una vez concluido, habrá que esperar un mínimo de diez años de pruebas antes de diseñar la siguiente fase del proyecto, un prototipo experimental que pudiera extraer energía utilizable a partir de la fusión de un plasma confinado en una botella magnética. Y aún habría que aguardar otra generación más antes de construir un reactor capacitado para suministrar energía a la red eléctrica.

Mientras tanto, la demanda energética mundial parece no tener fin. "La necesidad de energía es tan grande y crece en todo el mundo con tal rapidez que hemos de dar al problema un nuevo enfoque", explica Edward Moses, director del Centro Nacional de Ignición, un enorme centro de investigación de fusión por láser en Livermore, California.

En teoría, un reactor de fusión resolvería los problemas energéticos de la humanidad. El combustible sería deuterio, un isótopo del hidrógeno presente en el agua de mar. No produciría emisiones dañinas, residuos nucleares ni gases de efecto invernadero. El mismo proceso que proporciona al Sol su energía quedaría a nuestro servicio para alimentar el planeta.

En la práctica, sin embargo, no parece verosímil que la fusión nuclear cambie el mundo del modo en que los expertos esperaban. La tecnología necesaria para la ignición y el control de una fusión autónoma se muestra demasiado escurridiza. Además, el coste de los primeros reactores será probablemente tan elevado que no los veremos proliferar en este siglo.

Moses y otros científicos opinan que la vía más rápida para explotar la energía de fusión habrá de basarse en una técnica híbrida; a saber, emplear las reacciones de fusión para acelerar los procesos de fisión de los residuos nucleares. El método, bautizado con el nombre de LIFE (del inglés para "energía de fusión inercial por láser"), consiste en concentrar la energía de potentes láseres sobre diminutas cápsulas de combustible nuclear. Los disparos desencadenarían reacciones de fusión que liberarían neutrones muy energéticos. Una vez proyectados hacia el exterior, esos neutrones impactarían contra un material fisible, ya se tratase de los residuos nucleares de una central de fisión ordinaria o de uranio empobrecido. Dichas colisiones generarían nuevas desintegraciones radiactivas que, amén de proporcionar energía utilizable, acelerarían la descomposición del material en isótopos estables, lo que de paso resolvería el problema de la eliminación de residuos radiactivos. Moses afirma que podría tener terminado un prototipo experimental para un reactor LIFE hacia 2020 y que, en torno a 2030, debería estar listo para ser conectado a la red eléctrica.

En otras palabras, dispondremos de un reactor de fusión operativo dentro de unos veinte años.



Anticiparse al alzheimer

Los tratamientos presintomáticos podrían resultar clave para retrasar o detener la principal causa de demencia

Gary Stix

En su obra maestra magicorrealista *Cien años de soledad*, Gabriel García Márquez transporta al lector a la mítica aldea de Macondo situada en el centro de la jungla. En una de las escenas más memorables, los habitantes de la aldea padecen una enfermedad que les hace perder todos los recuerdos. La enfermedad borra "el nombre y la noción de las cosas y, por último, la identidad de las personas". Los síntomas persisten hasta que aparece un gitano errante con una bebida "de un color agradable" que les devuelve la salud.

En el siglo XXI se da un caso parecido al de los ciudadanos de Macondo: unos cientos de habitantes de Medellín y otras regiones cercanas dedicadas al cultivo del café contribuyen al descubrimiento de una versión, en la vida real, del brebaje del gitano. Medellín y su entorno albergan el mayor número de individuos en el mundo con una forma hereditaria de la enfermedad de Alzheimer. Los miembros de 25 familias extensas, que suman unas 5000 personas, cuando son portadores de una versión aberrante de un determinado gen, padecen una forma de la enfermedad de Alzheimer de inicio precoz, que se manifiesta antes de alcanzar la edad de 50 años.

La enfermedad de Alzheimer de inicio precoz es transmitida por un único progenitor como un rasgo genético dominante. Representa menos del 1 por ciento de los 27 millones de casos de alzheimer documentados en todo el mundo en 2006, pero sus lesiones cerebrales peculiares parecen ser idénticas a las que se observan en la forma más común, de inicio tardío, en la que los síntomas no aparecen hasta después de los 65 años.

La posibilidad de predecir el trastorno en las familias de Medellín ha atraído la atención de un grupo de científicos y compañías farmacéuticas que están considerando una nueva estrategia de investigación: se estudiará el efecto de los medicamentos en los pacientes antes de que manifiesten los primeros indicios de demencia.

En los últimos años, los diversos fármacos examinados para tratar la forma suave o moderada de la enfermedad de Alzheimer han fracasado. Los científicos se han convencido así de que la patología (acumulaciones de pro-

CONCEPTOS BASICOS

- La incidencia de la enfermedad de Alzheimer continúa aumentando a medida que la población envejece, pero no existen tratamientos eficaces para combatirla.
- Algunos medicamentos nuevos pueden haber fracasado porque los ensayos se realizaron en una fase demasiado avanzada de la enfermedad.
- Las nuevas técnicas para identificar la enfermedad antes de que surjan los síntomas permitirán el ensayo de medicamentos en una etapa en la que pueden ser más eficaces.

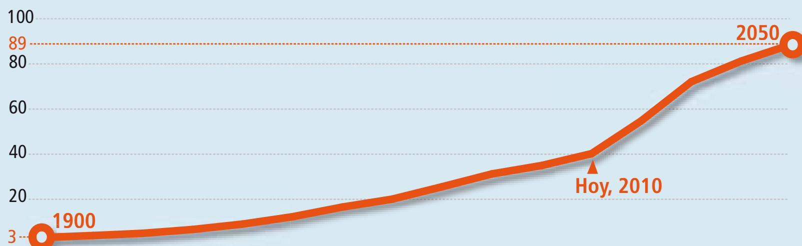
ETHAN HILL

LA MAREA QUE VIENE

A medida que la población estadounidense envejezca —al igual que la del resto del mundo— el número de nuevos casos de la enfermedad de Alzheimer se va a disparar, ya que su incidencia aumenta con la edad. En 2010, el número de ancianos en los Estados Unidos es de 39 millones, una cifra que alcanzará en 2050 los 89 millones, más del doble que la actual.

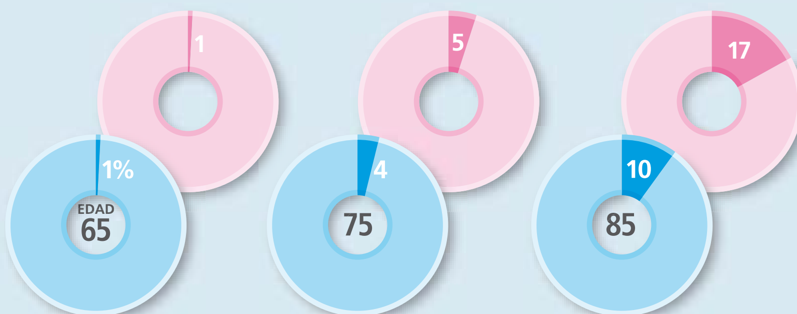
LA POBLACION ESTA ENVEJECIENDO…

Millones de personas con una edad igual o superior a 65 años que viven en los Estados Unidos.



…Y LA EDAD ES EL MAYOR FACTOR DE RIESGO PARA EL ALZHEIMER…

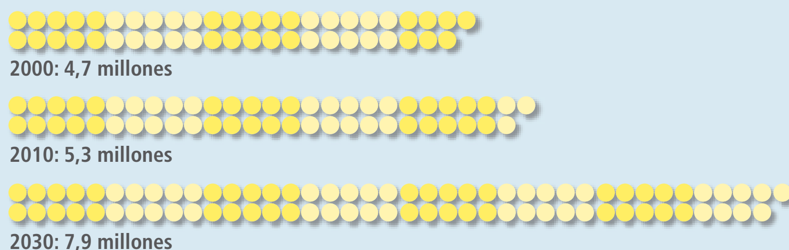
Riesgo de padecer la enfermedad de Alzheimer a una edad determinada y durante los próximos 10 años, en hombres (*azul*) y en mujeres (*rosa*).



…POR LO QUE EL NUMERO DE CASOS ESTA AUMENTANDO

El número de personas diagnosticadas con la enfermedad de Alzheimer aumentará en casi un 50 por ciento durante los próximos 20 años

Un punto representa 100.000 personas diagnosticadas con la enfermedad de Alzheimer.





teínas aberrantes y desaparición de células o circuitos cerebrales) comienza mucho antes de que se evidencie la pérdida de memoria. Ello se ha confirmado con las nuevas técnicas, que permiten identificar la enfermedad años antes de los primeros síntomas. De lo que se deduce que un tratamiento eficaz debe empezar durante los primeros años del lento proceso patológico, aunque la memoria del paciente permanezca inalterada.

En consecuencia, gran parte de los esfuerzos dedicados a la investigación del alzheimer se está reorientando para tratar de detener la enfermedad antes de que aparezcan los síntomas. No se estudian sólo los medicamentos, sino también la adopción de estilos de vida que resulten más seguros y menos costosos que recetar un medicamento durante 10 o 20 años.

Un inicio precoz

Las familias colombianas con la enfermedad de Alzheimer se sitúan en la vanguardia de los estudios de prevención. Francisco Lopera, el neurólogo que hace 28 años descubrió esas familias —según se demostró más tarde, portadoras de la mutación *paisa* (por el apodo que reciben los habitantes de la región)—, ha empezado a contactar con cientos de miembros todavía sanos de las familias. Desea saber si aceptarían participar en un ensayo clínico con medicamentos que podrían eliminar o detener la acumulación de los péptidos beta-amiloides, los fragmentos proteicos tóxicos que deterioran las células cerebrales en las primeras etapas del proceso. En palabras de Lopera, "la contribución de esas familias arrojaría mucha luz sobre el tratamiento y la prevención de la enfermedad de Alzheimer, tanto si es de inicio precoz como tardío".

El estudio planeado, que se iniciará el próximo año, forma parte de un proyecto más amplio, la "Iniciativa para la Prevención de la Enfermedad de Alzheimer" (IPA). Los miembros de las familias portadores de la mutación y con una edad en torno a los 40 años comenzarán a recibir una terapia antiamiloide (en forma de medicamento o de vacuna) que ya ha superado las pruebas de seguridad en pacientes diagnosticados con alzheimer. Ya hay conversaciones en marcha para enviar un ciclotrón (un pequeño acelerador de partículas), que será compartido por un grupo de hospitales de Medellín; así podrán fabricar los trazadores radioactivos necesarios en los estudios de imágenes que permitirán determinar si el medicamento impide la acumulación de amiloide.

El estudio evaluará si un tratamiento administrado siete años antes del promedio de edad

LUCY READING-IKKANDA (*gráfica superior*); LORENA ROS *Getty Images* (*paciente encamada*); DATA FROM ALZHEIMER'S ASSOCIATION (*gráficos inferiores*)

en que se diagnostica la enfermedad puede demorar o detener el silencioso e inexorable avance de la misma en miembros de las familias que portan el gen. Además de analizar determinadas terapias, los diseñadores de los ensayos clínicos colombianos también tratan de ver si el análisis de los biomarcadores específicos del alzheimer permite demostrar la eficacia de un tratamiento. (Un biomarcador es un indicador que se puede medir —como la concentración de una proteína— y que varía en función del avance o regresión de una enfermedad.) Un conjunto de biomarcadores fiables permitiría a quienes investigan con fármacos y a los médicos valorar el éxito de un tratamiento con relativa prontitud; podrían medir así los cambios experimentados por esas moléculas de referencia, en lugar de tener que esperar a evaluar los síntomas. La IPA pretende llevar a cabo un conjunto similar de ensayos clínicos con un grupo radicado en los Estados Unidos e integrado por portadores de dos copias de la variante *APOE4* del gen. Esa variante incrementa la proclividad a la enfermedad de Alzheimer, aunque no es seguro que los portadores la contraigan.

En caso de tener éxito, la IPA serviría como modelo para generalizar los ensayos clínicos de prevención del alzheimer basados en biomarcadores. Demostrar que un medicamento evita un trastorno resulta mucho más largo y costoso que determinar su eficacia en un paciente que ya presenta los síntomas. Según María Carrillo, directora principal para las relaciones médicas y científicas de la Asociación estadounidense contra la enfermedad de Alzheimer, "una compañía farmacéutica no va a invertir en un ensayo clínico de prevención, de mayor duración, con un fármaco que no se ha comprobado y que puede no funcionar".

Con un conjunto de biomarcadores conocidos, una compañía farmacéutica podría analizar si un fármaco produce cambios en los niveles de amiloide u otro tipo de biomarcador, del mismo modo en que los médicos analizan los niveles de colesterol para determinar si una estatina está ayudando a prevenir una enfermedad coronaria. Eric M. Reiman, director ejecutivo del Instituto Banner para el estudio de la enfermedad de Alzheimer, en Phoenix, quien, junto con Pierre N. Tariot, puso en marcha la IPA, afirma: "Necesitamos dar un impulso a los tratamientos presintomáticos. En caso contrario, podríamos perder toda una generación".

Los ensayos de prevención siguen planteando numerosos obstáculos: en los pacientes que aún no presentan síntomas, resulta difícil valorar los posibles beneficios del tratamiento frente a los inevitables efectos secundarios de los medicamentos. Además, nadie puede predecir si un fármaco que ha demostrado ser útil en el alzheimer de inicio precoz también funcionará en pacientes sin la mutación génica que da lugar a esa variante del trastorno. Pero la urgencia por descubrir nuevos tratamientos y el aliciente que supone descubrir un fármaco que genere miles de millones de dólares ha dado impulso a las estrategias de prevención. En una reunión de la IPA celebrada en enero pasado, diecinueve compañías farmacéuticas y biotecnológicas debatieron la posibilidad de formar un consorcio no competitivo donde las instituciones académicas y la industria colaborasen en los estudios clínicos y compartiesen los resultados.

Ya existen algunos tratamientos contra el alzheimer, pero apenas logran demorar su avance. Una terapia que verdaderamente modificase la enfermedad satisfaría la abrumadora demanda de los pacientes. Los estadísticos predicen que, a mitad de siglo, la prevalencia global del trastorno se cuadruplicará y afectará a 107 millones de personas. Un tratamiento que retrase el inicio de la patología, aunque sea sólo cinco años, reduciría a la mitad el número de fallecimientos a causa de la enfermedad.

Alteraciones en el cerebro

Hace sólo cinco años, un ensayo clínico para la prevención de la enfermedad de Alzheimer basado en biomarcadores se hubiese desestimado por fantasioso. Pero en la actualidad ese tipo de estudios está rindiendo sus frutos. La obtención de imágenes y otras técnicas, tan

100 AÑOS DE INVESTIGACION

1906: Alois Alzheimer describe, basándose en una autopsia de cerebro, las placas extracelulares y los ovillos de fibras en el interior de las neuronas que caracterizan la enfermedad.

Los siguientes 50 años: Se considera que la pérdida de memoria y otros síntomas se deben a la senilidad que resulta del envejecimiento.

Años sesenta: Se establece una conexión entre el deterioro cognitivo y el número de placas y de ovillos de fibras en el cerebro.

Años ochenta: Los investigadores empiezan a desentrañar las bases bioquímicas de la formación de las placas y los ovillos de fibras.

Años noventa: Diversos descubrimientos identifican los factores genéticos que subyacen a la enfermedad. Aparecen en el mercado los primeros medicamentos que mejoran los síntomas.

Década de 2000: La obtención de imágenes y las muestras de líquido cefalorraquídeo permiten estudiar el avance de la enfermedad. Diversos fármacos dirigidos a determinados procesos patológicos fracasan en los ensayos clínicos, lo que sugiere la necesidad de empezar antes el tratamiento.

Cierto alivio, pero no suficiente

Los medicamentos actuales tratan únicamente los síntomas cognitivos, no el proceso patológico subyacente, y funcionan durante un tiempo limitado que va desde unos meses hasta unos pocos años.

TIPO DE MEDICAMENTO:
Inhibidor de la acetilcolinesterasa
(Ejemplos: donepezilo, galantamina)

Efecto:
Inhibe la acción de una enzima (la acetilcolinesterasa) de modo que asciende la concentración de acetilcolina, una sustancia del cerebro. El aumento de la acetilcolina mejora la cognición, el estado de ánimo y el comportamiento, con lo que aumenta la calidad de vida del paciente.

TIPO DE MEDICAMENTO:
Antagonista del receptor NMDA
(Un fármaco: memantina)

Efecto:
Ayuda a aplacar la hiperactividad provocada por el glutamato, un señalizador químico que puede dar lugar a la destrucción de las neuronas. El fármaco no interfiere con el conjunto de lesiones celulares que provocan el avance de la enfermedad.



MACDUFF EVERTON *Getty Images*

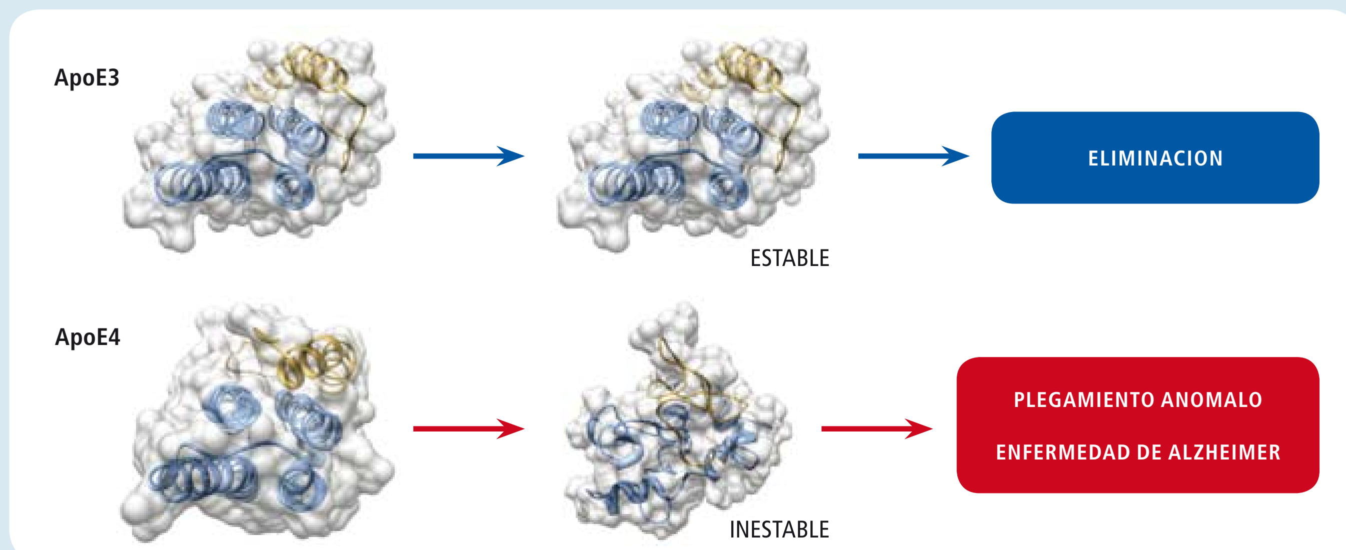
BASES MOLECULARES DEL ALZHEIMER

Diversos procesos bioquímicos determinan la aparición y el desarrollo del síndrome de Alzheimer. Naturalmente, el envejecimiento favorece muchos de esos procesos y constituye una de las causas principales del número creciente de casos de esta enfermedad en la sociedad actual. Sin embargo, otras circunstancias, sobre todo de carácter genético, representan un factor de predisposición a la enfermedad.

El patrimonio genético humano varía de un individuo a otro. Pero mientras que la mayoría de las variaciones no tienen consecuencias en la salud, otras aumentan en gran medida nuestra proclividad a enfermar. Así, se ha demostrado que ciertos individuos, por presentar una proteína ligeramente distinta a la habitual, tienen mayor riesgo de contraer la enfermedad de Alzheimer. Se trata de la apolipoproteína de tipo E (ApoE), una proteína implicada en una de las vías bioquímicas menos conocidas del alzheimer. De hecho, alrededor del 80 por ciento de los casos de la enfermedad están relacionados con las variaciones del gen responsable de la expresión de ApoE.

ApoE participa, entre otras funciones, en la regulación de los niveles de colesterol en el cerebro. En el ser humano, ApoE presenta tres formas, ApoE2, ApoE3 y ApoE4, que se distinguen por la modificación de un aminoácido. La forma ApoE3 corresponde a la variante más común en los humanos; en cambio, la ApoE4 está altamente vinculada, entre otros trastornos, a la enfermedad de Alzheimer y al infarto cerebral.

Diversos trabajos *in vivo* e *in vitro* han demostrado la elevada probabilidad de una interacción directa entre uno de los principales protagonistas de la enfermedad de Alzheimer, el péptido beta-amiloide (*arriba a la izquierda en el recuadro* "Nuevas técnicas para la detección precoz") y la ApoE. Mientras que los individuos con la variedad ApoE3 parecen poder llevar a cabo la eliminación del péptido beta-amiloide, los que poseen la forma ApoE4 lo harían con mayor dificultad, lo que desembocaría en la acumulación del péptido en el cerebro y en las manifestaciones posteriores de la enfermedad. La extrema similitud de las secuencias de aminoácidos de las diferentes formas de la ApoE complica la identificación del origen de ese fenómeno.



LA PROTEINA ApoE presenta tres formas ligeramente distintas (ApoE2, ApoE3 y ApoE4), pero sólo una de ellas (ApoE4) guarda una estrecha relación con la aparición de la enfermedad de Alzheimer. En presencia del péptido beta-amiloide (*dorado*), ApoE4 (*azul*) pierde su estructura funcional. Esta desnaturalización impediría la correcta eliminación del péptido (que también sufre una modificación estructural) y favorecería la consiguiente acumulación del mismo en forma de placas.

JEAN-DIDIER MARECHAL Y ALEX PERALVAREZ

extendidas hoy por todo el mundo, permiten analizar los biomarcadores y conocer el proceso patológico subyacente. En los Estados Unidos, desde 2004, la Iniciativa para la neuroimagen de la enfermedad de Alzheimer (INEA), una colaboración entre compañías farmacéuticas, instituciones académicas y el Instituto Nacional de la Salud, ha venido desarrollando métodos para evaluar mejor la eficacia de los medicamentos ensayados en enfermos de alzheimer, un objetivo que poco después se ha ampliado para investigar qué les sucede a los afectados antes de confirmar el diagnóstico.

Una interesante publicación sobre los avances en este campo apareció el 21 de enero pasado. Clifford R. Jack, director del grupo de la INEA que estudiaba biomarcadores detectables mediante resonancia magnética (RM), describió un modelo sobre el progreso de la enfermedad y lo asoció a marcadores que permitirían analizar la evolución de la patología. Jack presentó en línea su trabajo, ante una audiencia de más de 100 personas, durante un seminario realizado por Internet en la página web de Alzforum, con la participación de numerosos investigadores destacados en el campo. Alzforum constituye un lugar de encuentro para el intercambio de ideas, un depósito de artículos científicos y quizá la colección más completa existente de artículos periodísticos sobre la investigación del alzheimer.

Comprender los mecanismos moleculares de la interacción entre las distintas formas de la ApoE y el péptido beta-amiloide resulta fundamental para diseñar un tratamiento farmacológico destinado a bloquear este punto del desarrollo de la enfermedad. Desgraciadamente, determinar las características de esa interacción resulta sumamente complicado con las técnicas de laboratorio actuales. Con el fin de superar esta limitación, hemos desarrollado, en colaboración con Jinghui Luo, Sebastian Wärmländer y Astrid Gräslund, de la Universidad de Estocolmo, una simulación computacional para establecer una primera aproximación sobre los mecanismos moleculares del reconocimiento entre las formas de ApoE y el péptido beta-amiloide.

La investigación, publicada el pasado febrero en *PLoS Computational Biology*, ha proporcionado un modelo tridimensional dinámico que simula la interacción entre el péptido beta-amiloide y las diferentes formas de la ApoE. Por primera vez, se ha establecido una base molecular del fenómeno. En la simulación se ha observado una pérdida de la estructura funcional de la forma ApoE4 en presencia del péptido beta-amiloide, lo que no sucede con las formas ApoE2 y ApoE3. Ello pone de manifiesto que las diferentes formas de la ApoE no interactúan de igual manera con el beta-amiloide y que la sutil divergencia de ApoE4 respecto a las demás lleva a su desnaturalización al entrar en contacto con el péptido. Como consecuencia probable de ese deterioro, se suprimiría el primer paso de la excreción del péptido beta-amiloide.

El conocimiento de la pérdida de la estructura funcional en ApoE4 abre nuevas vías de exploración para entender y combatir la enfermedad de Alzheimer. En las próximas etapas del estudio se considerarán la validación experimental de los fenómenos moleculares observados en las simulaciones, así como el análisis por medios computacionales de otras etapas del trastorno.

Jean-Didier Maréchal
Departamento de Química
Alex Perálvarez
Departamento de Bioquímica y Biología Molecular
Universidad Autónoma de Barcelona

En el seminario, Jack señaló que las mediciones de biomarcadores han demostrado que el proceso degenerativo comienza años antes de la aparición de los síntomas que permiten formular un diagnóstico. Durante ese período (de entre 5 y 20 años), un tipo concreto de péptido amiloide empieza a formar agregados en el exterior de las células del cerebro y daña las sinapsis, los puntos de contacto entre neuronas. Un trazador radioactivo, como el compuesto B de Pittsburgh (BP), se une al amiloide en el cerebro de un paciente y, posteriormente, se obtienen imágenes mediante tomografía de emisión de positrones (TEP). Mediante esta técnica de obtención de imágenes (TEP-BP) se ha demostrado que el proceso de agregación empieza a estabilizarse antes de que surjan los síntomas definitivos.

Más tarde, aunque también antes de emitirse el diagnóstico, las proteínas tau, que normalmente ofrecen un soporte estructural a las neuronas, se desprenden del citoesqueleto interno de las células y forman ovillos fibrosos que provocan el caos en el interior de las células. La acumulación de la proteína tau se puede detectar mediante un análisis del líquido cefalorraquídeo. El análisis también permite identificar una disminución de los niveles de beta-amiloide en el líquido, a medida que los péptidos van desapareciendo del mismo para acumularse en el cerebro. La observación simultánea de una disminución de los niveles de beta-amiloide y un aumento de tau en el líquido cefalorraquídeo indican claramente el avance de la enfermedad.

Entre uno y cuatro años antes de diagnosticarse la enfermedad de Alzheimer a una persona, se inicia una fase de deterioro cognitivo leve. Se caracteriza por síntomas que van desde los lapsus en la memoria hasta una dificultad en la toma de decisiones. El deterioro puede aparecer por causas distintas al alzheimer, pero en aquellos que sufrirán la demencia de Alzheimer la pérdida cognitiva se debe a la muerte o lesión de las neuronas de determinadas regiones del cerebro, una destrucción que se va acelerando con el tiempo. (Si los problemas de memoria constituyen el síntoma principal, el paciente, con frecuencia, termina padeciendo alzheimer.) Esa etapa se puede identificar mediante RM volumétrica, una técnica de obtención de imágenes que mide la disminución de volumen cerebral según las neuronas van pereciendo. La cascada de sucesos, incluida la acumulación inicial de amiloide, desbarata el metabolismo celular. Esa alteración se puede detectar mediante la TEP con fluorodesoxiglucosa (TEP-FDG), una variante de la TEP que permite evaluar el estado metabólico de las neuronas.

¿Mejora en verdad el paciente?

Los ensayos clínicos de prevención basados en biomarcadores plantean una serie de dificultades, no sólo para las compañías farmacéuticas, sino también para las autoridades sanitarias; asimismo, suponen un obstáculo para el avance de la IPA y otros esfuerzos preventivos. Para que se autorice, un medicamento contra el alzheimer debe demostrar los beneficios cognitivos que aporta (en la memoria, el lenguaje u otro parámetro asociado) en comparación con el placebo.

Si un estudio de prevención se centra en un biomarcador, en lugar de los síntomas, debe garantizarse que los resultados de los análisis

En ausencia de medicamentos eficaces, se están explorando los efectos de la dieta junto con el ejercicio físico y mental como medidas preventivas

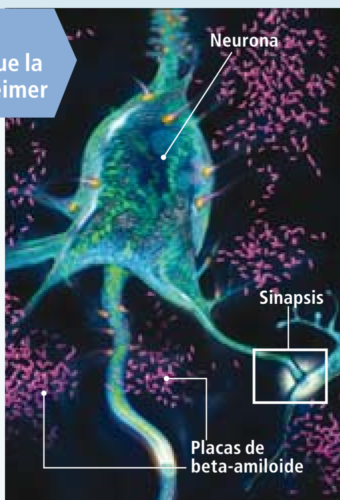
NUEVAS TECNICAS PARA LA DETECCION PRECOZ

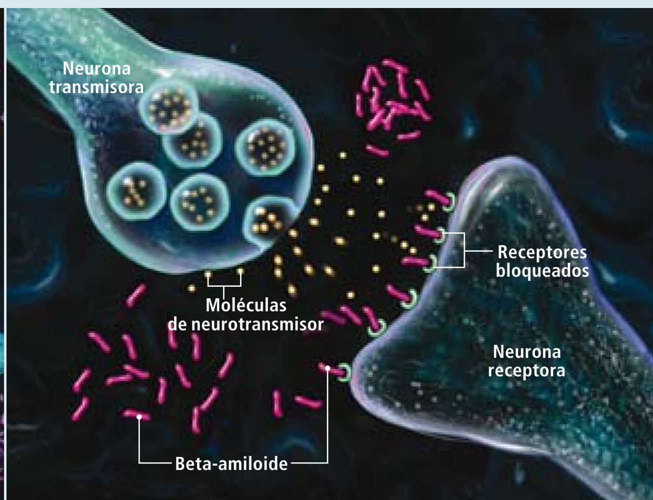
El proceso que da lugar a la enfermedad de Alzheimer comienza años antes de la aparición de los síntomas que permiten realizar un diagnóstico. Hoy en día, puede realizarse un seguimiento de este proceso mediante técnicas (entre ellas, los estudios de neuroimagen y los análisis del líquido cefalorraquídeo) que identifican los biomarcadores relacionados con el trastorno. Se descubren así las alteraciones biológicas (como el aumento de la concentración de proteínas tóxicas) que se producen en el transcurso de la enfermedad. Los investigadores esperan que, algún día, los análisis de los biomarcadores permitan reconocer la fase incipiente de la enfermedad y que los tratamientos durante esa fase demoren o eviten la aparición de la demencia.

AGREGACION DEL AMILOIDE

Entre 5 y 20 años antes de que se diagnostique la demencia asociada a la enfermedad de Alzheimer

En un primer momento, un fragmento proteico denominado beta-amiloide forma agregados en los centros cerebrales responsables de la memoria reciente. La acumulación de amiloide, un biomarcador que se identifica por la presencia de placas, provoca daños en las sinapsis, las interfases entre neuronas (*detalle*). El amiloide evita que las señales químicas (neurotransmisores) lleguen a los receptores de las neuronas que deben recibirlas. Esta acumulación se puede detectar mediante diversas técnicas de neuroimagen. Entre ellas, cabe destacar la tomografía por emisión de positrones (TEP) con el empleo del compuesto B de Pittsburgh, una sustancia radioactiva, que se une de forma específica al amiloide. También se puede realizar una punción lumbar para cuantificar el biomarcador amiloide.

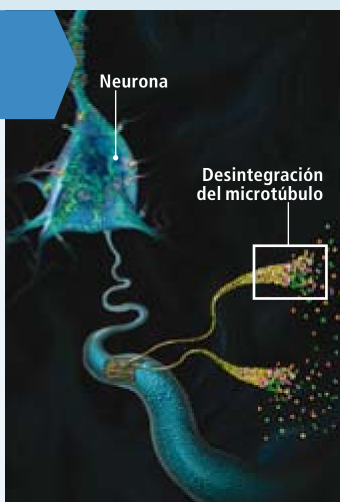


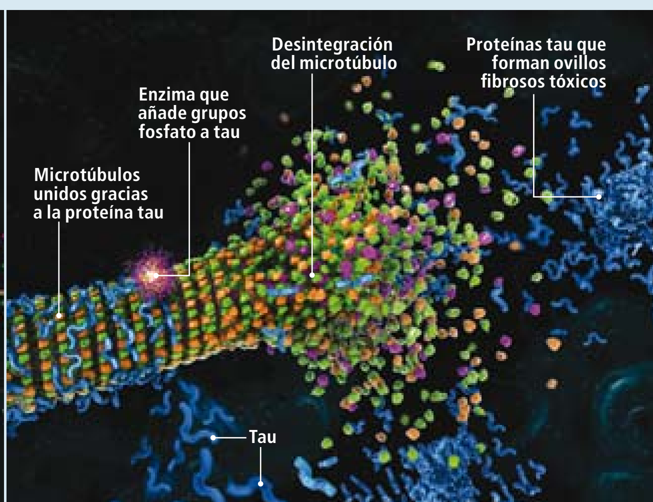


ACUMULACION DE LA PROTEINA TAU

Entre 1 y 5 años antes del diagnóstico

Antes de que los síntomas justifiquen el diagnóstico de la enfermedad de Alzheimer, la proteína tau, en el interior de las neuronas, empieza a comportarse de forma anómala. Normalmente, esa sustancia ayuda a mantener la estructura de unos tubos diminutos (microtúbulos) que son cruciales para el correcto funcionamiento de las neuronas. Pero ahora, se empiezan a acumular grupos fosfato sobre las proteínas tau (*detalle*), que se disocian de los microtúbulos. Los túbulos siguen desintegrándose y, a continuación, la proteína tau se agrega y origina un ovillo fibroso que interfiere con las funciones celulares. A partir de una muestra de líquido cefalorraquídeo puede detectarse este proceso.

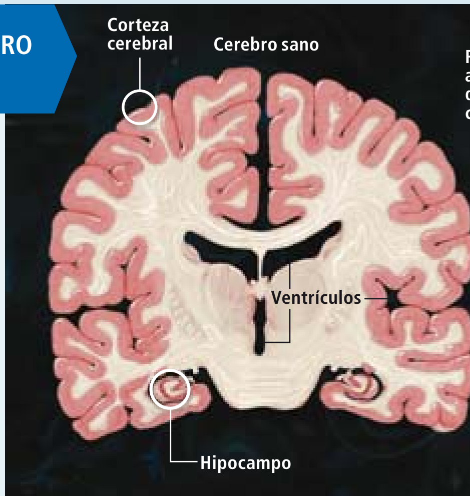


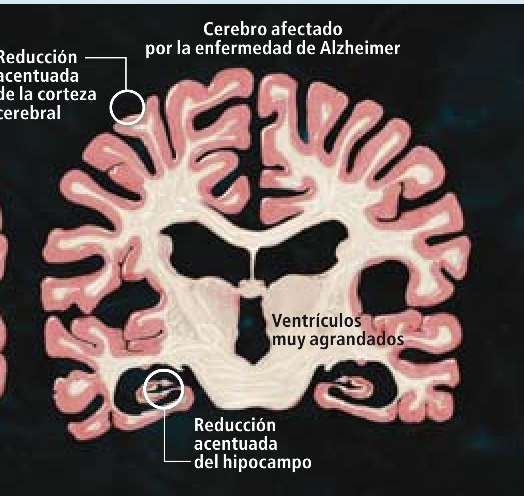


DISMINUCION DEL VOLUMEN DEL CEREBRO

Entre 1 y 3 años antes del diagnóstico

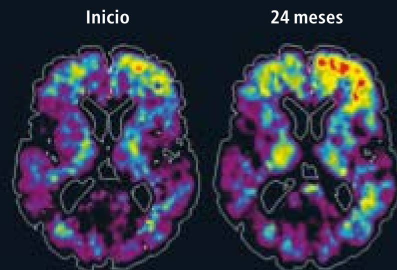
A medida que avanza el proceso causante de la enfermedad, las células nerviosas empiezan a morir y los pacientes y la familia notan lapsus de memoria y otros fallos cognitivos. La muerte celular hace que el cerebro se encoja en regiones implicadas en la memoria (el hipocampo) y en otras funciones cerebrales de mayor relevancia (la corteza). Esos signos se pueden identificar gracias a una variante de la resonancia magnética que permite medir el volumen del cerebro. El encogimiento se acelera y termina por afectar a numerosas regiones cerebrales.





ANDREW SWIFT (*ilustraciones*)

TECNICAS CON BIOMARCADORES



En una persona de 74 años, las imágenes de la TEP muestran, en los lóbulos frontales del cerebro, un aumento de la retención de BP (compuesto que permite identificar el beta-amiloide) al cabo de dos años, a pesar de que durante ese período la cognición del paciente se mantuviera normal.



Una punción lumbar permite medir los niveles de la proteína tau.

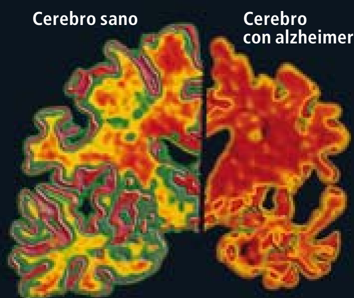


Gráfico generado por ordenador de secciones que representan un cerebro normal y otro afectado por la enfermedad de Alzheimer. Se ha empleado la resonancia magnética volumétrica, que demuestra una reducción considerable del cerebro (*derecha*) debido a la degeneración y muerte de células nerviosas.

CORTESIA DEL GRUPO AMYLOID IMAGING DE LA UNIVERSIDAD DE PITTSBURGH (*PET*); DAVID HOFFMAN *PHOTO LIBRARY Alamy (punción lumbar)*; A. PAKIEKA *Photo Researchers, Inc. (secciones cerebrales)*; BASADO EN UNA PRESENTACION DE CLIFFORD R. JACK DE LA CLINICA MAYO

presagian el riesgo de demencia. Por ejemplo, se desconoce todavía si la modificación de los niveles de beta-amiloide evitará la demencia, a pesar del conjunto importante de datos que indican la contribución del beta-amiloide en la manifestación de la enfermedad.

De hecho, en uno de los primeros ensayos clínicos sobre un tratamiento antiamiloide, los niveles del péptido disminuyeron en algunos pacientes pero apenas demostraron mejorar la cognición. Tal y como afirma Russell Katz, director de la división de productos neurológicos de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos, "nos preocupa la posibilidad de que un medicamento ejerza el efecto deseado sobre un marcador, pero no modifique el cuadro clínico del paciente. En otras palabras, su enfermedad sigue avanzando y no experimenta ninguna mejoría". Katz plantea una estrategia que ayudaría a incorporar los biomarcadores en los ensayos clínicos: primero se debería demostrar que la reducción de los niveles de amiloide o de otro biomarcador beneficia a los pacientes con un deterioro cognitivo leve o recién diagnosticados con la enfermedad; sólo después, podrían ensayarse esos biomarcadores en personas que no presentaran síntomas. La mejor manera de llegar a ese punto consistiría en empezar con pacientes que experimentaran síntomas recientes, y a partir de ahí, ir retrocediendo para ganar terreno a la enfermedad.

Pero los investigadores de los estudios de prevención colombianos corroboran la capacidad actual de los biomarcadores para detectar un deterioro leve de la memoria, con lo que disipan en parte las dudas de Katz. Y Reiman cita el trabajo realizado por su grupo, donde se aportan datos que también aliviarían las inquietudes de las autoridades sanitarias. En ese estudio, los portadores de la variante del gen *APOE4* exhibieron una leve disminución en la puntuación de las pruebas psicológicas y de memoria muchos años antes de que se pudiese observar cualquier otro tipo de déficit cognitivo. Reiman afirma que, gracias a la sensibilidad del método, en un ensayo clínico de prevención, la aplicación de una prueba cognitiva junto con la medición de un biomarcador podría bastar para saber si la reducción de los niveles de amiloide mejorará las perspectivas de evitar la demencia. De momento, todavía hay que convencer a Katz. "¿Qué pruebas hay de que esos pacientes, a pesar de su deficiencia cognitiva, vayan a contraer alzheimer?"

Algunas compañías están intentando perfeccionar el empleo de los biomarcadores. Bristol-Myers Squibb ha venido obteniendo muestras de líquido cefalorraquídeo de pacientes con deterioro cognitivo leve con el fin de predecir cuáles de ellos terminarán padeciendo alzheimer. Se seleccionarán los pacientes que presenten una concentración baja de beta-amiloide y alta de tau para participar en un ensayo clínico sobre un medicamento que inhibe la gamma-secretasa, una enzima implicada en la fabricación del péptido beta-amiloide. Según señala Vlad Coric, director médico de investigación clínica de la compañía, los que carezcan del biomarcador asociado a la fisiopatología de la enfermedad no se incluirán en el grupo del estudio que recibirá el tratamiento. Al centrarse sólo en los pacientes con una probabilidad mayor de ser diagnosticados con la enfermedad, resultará más fácil demostrar la eficacia del medicamento. Conclusión más difícil de alcanzar si en el ensayo se incluyeran participantes con menos riesgo de contraer alzheimer. Y añade: "mirando hacia el futuro, quizá convendría iniciar aún más pronto los ensayos clínicos con fármacos, durante la fase presintomática".

Una tienda cognitiva

Las familias colombianas con la enfermedad de Alzheimer que constituyen el núcleo de la IPA también han servido de inspiración para otra innovadora estrategia de prevención. El neurólogo Kenneth S. Kosik, que ha trabajado con las familias colombianas durante casi 20 años y ha ayudado a identificar la mutación *paisa*, estableció el año pasado una "tienda cognitiva" (según él mismo bautizó) en un barrio residencial de Santa Bárbara, California. Fue Kosik quien organizó una reunión fundamental en Medellín para incorporar a Lopera y a las familias colombianas en la IPA.

La "tienda cognitiva" —Centro de Salud Cognitiva y Terapias Innovadoras (CSCTI)— es un refugio para quienes presentan síntomas de alteración de la memoria, que en ocasiones preceden a la enfermedad de Alzheimer, así como para las personas sanas pero preocupadas por la enfermedad. Acuden al edificio de estilo mediterráneo para recibir consejos, basados en los mejores datos disponibles, sobre los cambios que pueden introducir en su estilo de vida para alejar el fantasma de la demencia, o sobre la mejor manera de hacer frente a la enfermedad en caso de padecerla.

Kosik copió la idea del CSCTI de la Casa Neurociencias, una clínica menos suntuosa para pacientes externos cerca del Hospital Central, en Medellín, lugar donde pasó muchas horas trabajando codo a codo con Lopera. Los pacientes con alzheimer portadores de la mutación *paisa*, a veces junto a docenas de miembros de la familia, debían trasladarse, en un largo viaje en autobús, desde el campo

¿POR QUE SE DEMORAN LOS TRATAMIENTOS?

Cualquier fármaco que retrase o detenga la enfermedad de Alzheimer representaría un éxito inmediato de ventas, quizá superiores a las de Prozac o Lipitor. Todavía no existe este tipo de medicamento en el mercado porque aún se está intentando averiguar cómo corregir los mecanismos de la enfermedad que dan lugar a la demencia.

Los medicamentos que impiden la acumulación de amiloide nos sirven de ejemplo. Distintos fármacos, actualmente en diversas fases de investigación, podrían inhibir la acumulación de amiloide o favorecer su eliminación. Sin embargo, ya han fracasado varios medicamentos antiamiloides aprobados en ensayos clínicos. (La tabla inferior ofrece un listado de los principales tipos de medicamentos contra la enfermedad de Alzheimer que se hallan en fase de desarrollo). Algunos investigadores se preguntan si se ha prestado suficiente atención a otros procesos que también contribuyen a la enfermedad. Entre el centenar de fármacos que se hallan en fase de desarrollo se encuentran algunos cuya acción se dirige a la proteína tau, que provoca daños en la célula. Otros están diseñados para evitar la inflamación, impulsar el funcionamiento de las mitocondrias, incrementar los niveles de insulina en el cerebro o proporcionar otros tipos de protección a las neuronas. El fracaso más reciente y más sonado lo constituye el Dimebón, un fármaco que no iba dirigido contra el amiloide. Al igual que en el caso del cáncer o del sida, quizá convendría combinar varios de esos fármacos para retrasar o detener la enfermedad.

FARMACOS ESTUDIADOS	ACTIVIDAD
Inhibidores de las enzimas que producen beta-amiloides	Impiden o modifican la actividad de las enzimas que fragmentan una proteína de gran tamaño (la proteína precursora del amiloide) para convertirla en los péptidos beta-amiloides.
Vacunas o antibióticos que disuelven los beta-amiloides	Inducen en el organismo la síntesis de anticuerpos que se unen al amiloide, que luego se eliminarán del cerebro. Por desgracia, en los ensayos clínicos, tanto las vacunas como los antibióticos han provocado efectos secundarios de diversa gravedad en algunos pacientes.
Inhibidores de la agregación de beta-amiloides	Podrían evitar el daño en las neuronas.
Compuestos antitau	Aunque menos numerosos que los dirigidos contra la ruta de los amiloides, esos fármacos adoptan diversas estrategias, como inhibir la producción de la forma tóxica de la proteína tau o impedir que ésta forme ovillos de fibras.
Agentes neuroprotectores	Diversas estrategias tratan de estimular ciertos compuestos naturales del cerebro que mejoran la salud de las neuronas. En una de ellas, se introduce un gen en el cerebro que da lugar a la síntesis de una sustancia protectora.

hasta la clínica. Pasaban el día en el recinto al aire libre de la clínica, donde el personal médico y los miembros de la familia tenían la oportunidad de establecer contacto. En palabras de Kosik, “era extraordinario que allí, con un sistema de salud menos desarrollado, la atención médica y los servicios complementarios funcionaran mejor”.

Durante sus viajes, Kosik concluyó que prefería ese ambiente a la eficacia médica de la facultad de medicina de Harvard. Allí había contribuido a la fundación de una clínica para los trastornos de la memoria en el Hospital Brigham & Women’s antes de trasladarse, en 2004, a la Universidad de California en Santa Bárbara. Le frustraba el hecho de que los pacientes acudieran a la clínica y, tras recibir el diagnóstico de alzheimer, se les despidiera. Aunque luego los examinaran cada seis meses, no podían hacer mucho más, aparte de certificar su deterioro.

El CSCTI combina la informalidad de la Casa Neurociencias con las recomendaciones sobre el estilo de vida. Muchas de ellas se basan en un conjunto cada vez mayor de datos, obtenidos en recientes estudios epidemiológicos o realizados con animales, que indican la mejora de la cognición con la adopción de determinados comportamientos. Los epidemiólogos realizan el seguimiento de un grupo de personas para determinar si el ejercicio físico, la dieta u otras actividades reducen el riesgo de padecer una enfermedad como el alzheimer, aunque faltan estudios más rigurosos para extraer conclusiones definitivas.

Tras una evaluación física y fisiológica, un cliente, nunca se utiliza la palabra “paciente”, recibe una serie de recomendaciones personalizadas, como seguir una dieta mediterránea (grasas saludables y consumo elevado de frutas y verduras), practicar ejercicios físicos aeróbicos y resolver juegos mentales por Internet. El centro participa en algunas actividades que todavía no se han convertido en una práctica estándar en lugares como la clínica para los trastornos de la memoria asociada a Harvard. Vivimos en una nueva era, en la que el paciente desea tener más control sobre su atención médica. Ello lo sabe bien Tonya Kydland, psicóloga cognitiva que ejerce en el centro como “orientadora”, ayudando a las personas a extraer datos de interés de la enorme cantidad de información médica presente en la Red. En semioscuridad, proyecta una gran imagen de un navegador de Internet sobre una pared de la sala de conferencias y conduce al cliente, página a página, a través de los ensayos clínicos o estudios recientes sobre la cúrcuma o cualquier otro suplemento dietético que pretende proteger las células cerebrales, y explica la solidez de las pruebas a favor de un compuesto en comparación con otro.

El CSCTI se ocupa también de la controvertida tarea de coordinar las pruebas para detectar la variante del gen *APOE4*. El análisis se realiza después de avisar al cliente sobre las implicaciones derivadas del conocimiento de los resultados: si da positivo, los hermanos y los hijos también pueden portar la misma versión del gen y, por tanto, hallarse en situación de alto riesgo. Los médicos desaconsejan las pruebas porque la identificación de la variante del gen no permite asegurar que se vaya a contraer alzheimer y, además, todavía no existen tratamientos eficaces para combatirlo.

Kosik, coautor de uno de los primeros artículos sobre la proteína tóxica tau, niega que se haya convertido en un médico chiflado, partidario de adoptar medidas excéntricas. Su





IMPORTADO DESDE COLOMBIA. En una clínica de Medellín, Colombia, el neurólogo Francisco Lopera (*el que señala con el dedo de la mano izquierda*) estableció una serie de cuidados estándar para el grupo más numeroso del mundo de familias afectadas por una variante hereditaria de la enfermedad de Alzheimer. La estrategia terapéutica instituida por el grupo de Lopera, centrada en la comunidad, sirvió de inspiración para la "tienda cognitiva" de Santa Bárbara (*derecha*), donde los clientes participan en programas de ejercicio físico y otras actividades encaminadas a reducir el riesgo de demencia.

CORTESIA DE NATALIA ACOSTA (*izquierda*); CORTESIA DE ASHLI PARK (*derecha*)

laboratorio de la Universidad de California en Santa Bárbara todavía investiga la proteína tau y otras bases biológicas inextricables de la enfermedad. El CSCTI trata de solventar las lagunas hasta que se descubran fármacos u otras medidas que demuestren eficacia. Según comenta Kosik, "las soluciones que ofrecemos aquí no son, a la larga, las mejores. Pero no sabemos cuándo aparecerá un medicamento que trate la enfermedad igual como lo hace la penicilina en una infección. Pienso que es una irresponsabilidad afirmar que será dentro de 5 o 10 años, porque no creo que se sepa".

En los años venideros, la estrategia del CSCTI para la prevención recibirá una vigilancia más estrecha de los ensayos clínicos financiados por el gobierno. Los ensayos se han diseñado para averiguar si la dieta y el ejercicio físico pueden retrasar la enfermedad y determinar la solidez estadística de los datos epidemiológicos. En palabras de Reisa Sperling, profesora de neurología en la facultad de medicina de Harvard, "una cuestión importante relativa al estilo de vida radica en saber el distinto efecto del cambio de hábitos en personas sanas en la actualidad y en personas con alteraciones cerebrales relacionadas con el alzheimer. Algunas de las modificaciones pueden modular el riesgo, pero si ya se ha iniciado el camino hacia la enfermedad (si se poseen los genes y ya se ha identificado el amiloide en el cerebro) puede que las intervenciones no ayuden a demorar su avance. De modo que es importante comprobar su eficacia mediante el uso de biomarcadores".

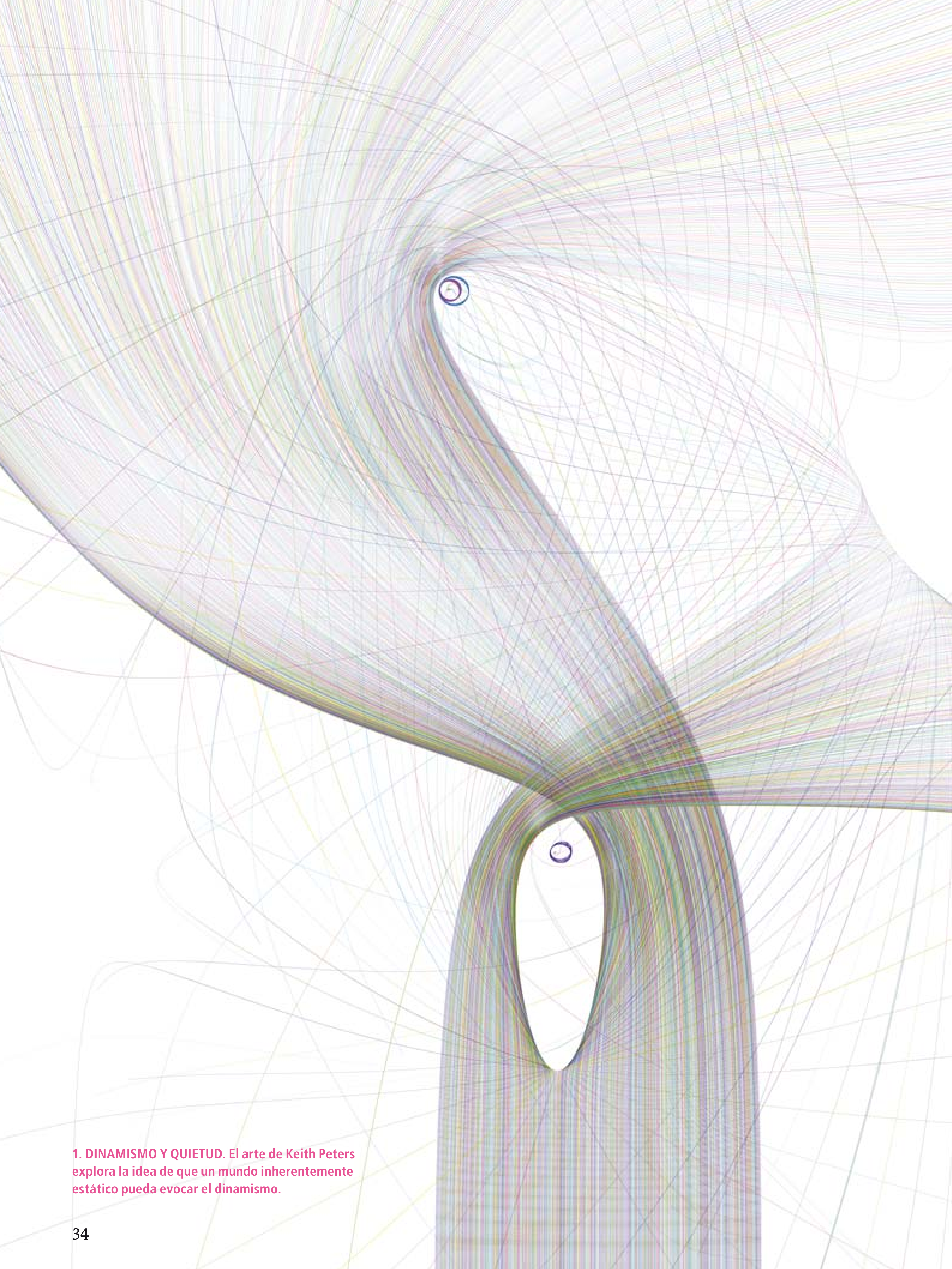
En última instancia, la técnica de TEP o una punción lumbar pueden determinar si las aceitunas, el queso de cabra y media hora diaria en la cinta de correr ayudan a mantener la cognición o si, sencillamente, se trata de una quimera. Si los biomarcadores demuestran ser útiles, la investigación biológica y el estudio del comportamiento pueden llegar a converger para dar lugar a una nueva ciencia de la prevención de la enfermedad de Alzheimer.

Bibliografía complementaria

THE ALZHEIMER'S PROJECT: MOMENTUM IN SCIENCE. Basado en un documental de la cadena de televisión HBO. John Hoffman y Susan Froemke, con Susan K. Golant. Public Affairs Books, Nueva York, 2009.

THE ALZHEIMER'S SOLUTION: HOW TODAY'S CARE IS FAILING MILLIONS AND WE CAN DO BETTER. Kenneth S. Kosik y Ellen Clegg. Prometheus Books, 2010.

BOOSTING POWER FOR CLINICAL TRIALS USING CLASSIFIERS BASED ON MULTIPLE BIOMARKERS. O. Kohannim, X. Hua, D. P. Hibar, S. Lee, Y. Y. Chou, A. W. Toga, C. R. Jack, M. W. Weiner y P. M. Thompson (INEA) en *Neurobiology of Aging*, 9 de junio de 2010.



1. DINAMISMO Y QUIETUD. El arte de Keith Peters explora la idea de que un mundo inherentemente estático pueda evocar el dinamismo.

¿Es el tiempo una ILUSION?

Los conceptos de tiempo y de cambio podrían emerger de un universo completamente estático

Craig Callender

Mientras usted lee esta frase, probablemente piense que este momento ("justo ahora") es lo que acontece. El instante presente se percibe como algo singular. Es real. Por más que se recuerde el pasado o se anticipe el futuro, vivimos en el presente. Por supuesto, el momento durante el cual leyó aquella frase ya sobrevino. El que acaece ahora es "este otro". Parece como si el tiempo fluyera, en el sentido de que el presente se va actualizando de modo constante. Tenemos la profunda intuición de que el futuro está indeterminado hasta que se hace presente y de que el pasado es inmutable. Conforme el tiempo fluye, esa estructura de pasado fijo, presente inmediato y futuro indefinido se traslada hacia delante en el tiempo. Y dicha estructura ha quedado plasmada en nuestro lenguaje, pensamiento y comportamiento. De ella depende la manera en que vivimos la vida.

Pero, por natural que parezca, ese modo de pensar no es inherente a la ciencia. Las ecuaciones de la física no nos indican qué sucesos están ocurriendo justo ahora. Son como un plano sin un símbolo que diga "usted está aquí". No existe en ellas el momento presente ni el flujo del tiempo. De hecho, la teoría de la relatividad de Albert Einstein sugiere que no sólo no existe un único presente especial, sino que todos los momentos son igualmente reales [*véase* "La flecha del tiempo", por Paul Davies; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2002]. En el fondo, el futuro no está más abierto que el pasado.

Ese desfase entre la comprensión científica del tiempo y nuestra intuición cotidiana ha inquietado a los sabios a lo largo de la historia, y se ha ensanchado todavía más conforme los físicos han ido despojando al tiempo de la mayoría de los atributos que comúnmente se le asignan. A día de hoy, el abismo que se abre entre el tiempo de la física y el tiempo de la experiencia cotidiana está llegando a su conclusión lógica: varios físicos teóricos han llegado a la convicción de que, desde un punto de vista fundamental, el tiempo ni siquiera existe.

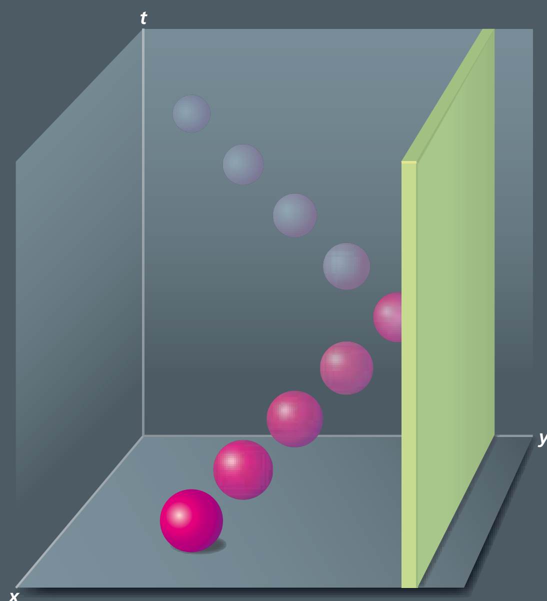
KEITH PETERS

CONCEPTOS BASICOS

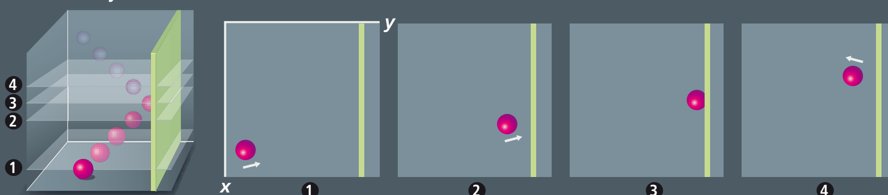
- El tiempo es uno de los conceptos físicos más debatidos. La búsqueda de una teoría unificada implica reconsiderar las suposiciones más elementales. Pocas lo son tanto como el tiempo.
- Algunos físicos opinan que, en realidad, el tiempo no existe. Otros piensan que el tiempo debería cumplir una función más fundamental. Entre ambas posturas se encuentra la noción fascinante de que el tiempo existe, pero no es fundamental. De alguna manera, un mundo estático da lugar al tiempo que percibimos.
- Esas ideas han sido objeto de debate filosófico desde épocas anteriores a Sócrates. Ahora, los físicos les confieren un cuerpo concreto. Según una propuesta, el tiempo surgiría a partir de la manera en que el universo se descompone en partes. Lo que percibimos como tiempo reflejaría las relaciones entre las partes.

Por qué el tiempo no es como el espacio

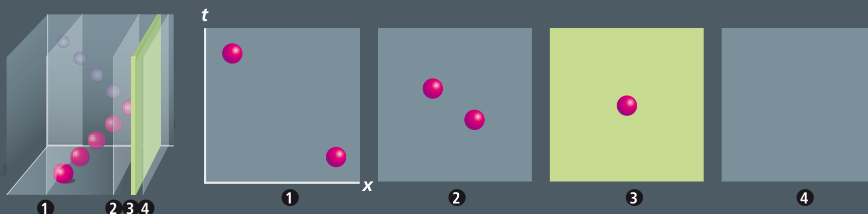
Físicos, ilustradores y artistas de toda índole suelen representar el tiempo como otra dimensión del espacio, lo que da lugar a un espaciotiempo unificado. Este ejemplo (en el que se ha eliminado una dirección espacial) muestra el espaciotiempo como un bloque tridimensional en el que un balón rebota contra una pared. La teoría de la relatividad sostiene que el espaciotiempo puede seccionarse de diversas maneras. Sin embargo, no todas son equivalentes.



Habitualmente se toman secciones espaciales en sucesivos instantes de tiempo. Ello crea una "película" que reproduce el movimiento del balón. Cada fotograma lleva al siguiente de acuerdo con las leyes familiares de la física.



También pueden considerarse secciones que no van del pasado al futuro, sino de "izquierda a derecha". Cada sección posee una parte espacial y otra temporal. A la izquierda de la pared, el balón aparece en dos posiciones; a la derecha, no existe. Si estas secciones parecen extrañas es porque en realidad lo son: las leyes de la física resultan muy difíciles de aplicar.



MELISSA THOMAS

La idea de una realidad en la que el tiempo no exista resulta tan desconcertante que es difícil concebirla de manera coherente. Todo lo que hacemos lo hacemos en el tiempo. El mundo es una serie de sucesos enhebrados por el tiempo. Cualquiera puede ver que nuestro cabello se vuelve cano, que los objetos se mueven y cosas por el estilo. Vemos los cambios, y el cambio no es sino la variación de las propiedades en el transcurso del tiempo. Sin tiempo, el mundo permanecería completamente inmóvil. Una teoría sin tiempo se enfrenta al reto de explicar por qué percibimos cambios si, en realidad, el mundo no cambia.

Algunas investigaciones recientes se proponen justamente esa proeza. Aunque puede que el tiempo no exista en un nivel fundamental, es posible que sí aparezca en niveles superiores. Percibimos una mesa como algo sólido, aunque en realidad no se trata sino de un amasijo de partículas que, en su mayor parte, se "componen" de espacio vacío. La solidez es una propiedad colectiva, o emergente, de las partículas. Del mismo modo, el tiempo podría ser una propiedad emergente de cualesquiera que fuesen los ingredientes básicos del mundo en que vivimos.

Esa noción de un tiempo emergente puede acabar siendo tan revolucionaria como la aparición, hace ya un siglo, de la teoría de la relatividad o de la mecánica cuántica. Einstein afirmaba que el paso crucial para desarrollar la teoría de la relatividad fue su nueva manera de concebir el tiempo.

De nuevo, los físicos que intentan unificar la relatividad general y la mecánica cuántica consideran crucial reconsiderar el concepto de tiempo. En 2008, el Instituto de Cuestiones Fundamentales (FQXi) convocó un certamen de ensayos sobre la naturaleza del tiempo al que concurrió un plantel de físicos de lo más granado. Muchos sostenían que la teoría unificada describirá un mundo sin tiempo. Otros manifestaban más reparos en deshacerse del concepto. Sin embargo, todos se mostraron de acuerdo en que, sin una profunda reflexión sobre el tiempo, la obtención de una teoría unificada quizá se antoje imposible.

> Sin una profunda reflexión sobre el tiempo, puede que los físicos nunca consigan avanzar hacia una teoría unificada

Auge y decadencia del tiempo

Las elaboradas nociones que el sentido común nos hace adscribir al tiempo han sufrido una demoledora serie de degradaciones a lo largo de los siglos. En física, el tiempo cumple numerosas funciones. Pero conforme la física ha evolucionado, esas funciones se han ido subarrendando una tras otra.

Si bien puede que en un primer momento no resulte obvio, las leyes del movimiento de Isaac Newton adjudican al tiempo un gran número de rasgos particulares. En principio, todos los observadores están de acuerdo sobre la secuencia en la que se suceden los acontecimientos. Con independencia de la manera

o el momento en que ocurra un suceso, la física de Newton asume que se puede decidir, de modo objetivo, si un hecho dado ocurre antes, después o a la vez que cualquier otro suceso del universo. El tiempo proporciona un ordenamiento completo de todos los acontecimientos del cosmos. El concepto de simultaneidad es absoluto, independiente del observador. Además, el tiempo debe ser continuo para poder definir la velocidad y la aceleración.

El tiempo clásico también debe poseer una noción de duración (lo que en el lenguaje matemático se conoce como una métrica), de modo que sea posible indicar cuán separados en el tiempo están unos sucesos de otros. Para afirmar que Usain Bolt corre a una velocidad de 43 kilómetros por hora, necesitamos disponer de una medida de la hora. Al igual que el orden de los sucesos, en la física de Newton la duración es también independiente del observador. Si Alicia y Benito salen del colegio a las tres en punto, van por caminos distintos y se encuentran en casa a las seis, el tiempo transcurrido para Alicia es igual que el que ha transcurrido para Benito.

En resumidas cuentas, Newton propuso que el mundo está equipado con un reloj patrón. Un reloj que, de manera única y objetiva, divide el mundo en instantes de tiempo. La física de Newton se rige a pies juntillas por el tic tac de ese reloj e ignora cualquier otro. Además, Newton pensaba que el tiempo fluye y que ese flujo nos proporciona una flecha que indica en qué dirección está el futuro, si bien es cierto que sus leyes no exigen estrictamente esas características adicionales.

A estas alturas, el tiempo de Newton nos puede parecer prosaico. Pero, si reflexionamos un poco, descubriremos cuán sorprendente es. Sus muchas propiedades (orden, continuidad, duración y simultaneidad absolutas, el flujo y la flecha) son separables desde un punto de vista lógico, pero todas ellas concurren en el reloj patrón que Newton denominó “tiempo”. Esta combinación de propiedades tuvo tanto éxito que sobrevivió sin fisuras durante casi dos siglos.

Llegaron entonces los embates de finales del siglo XIX y principios del XX. El primero fue obra de Ludwig Boltzmann, quien, con el argumento de que las leyes de Newton poseen simetría bajo inversión temporal (funcionan igual de bien hacia el futuro que hacia el pasado), adujo que el tiempo no esconde en sí ninguna flecha. En su lugar, propuso que la distinción entre pasado y futuro no es intrínseca al tiempo, sino que surge de las asimetrías en la forma en que la materia se organiza en el universo. Aunque los físicos todavía debaten los detalles de su propuesta [*véase* “El origen cósmico de la flecha del tiempo”, por Sean M. Carroll; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2008], Boltzmann fue persuasivo al despojar al tiempo newtoniano de una de sus características.

Algo después, Einstein lanzaría el siguiente asalto: prescindir de la noción de simultaneidad absoluta. Según la teoría de la relatividad especial, el que dos sucesos ocurran o no a la vez depende de la velocidad a la que se desplace el observador. El verdadero escenario en el que tienen lugar los sucesos no es el espacio ni el tiempo, sino su combinación: el espaciotiempo. Dos observadores que se muevan a velocidades diferentes no se pondrán de acuerdo acerca de cuándo o dónde tuvo lugar un suceso, pero sí convendrán en su localización espaciotemporal. El espacio y el tiempo son conceptos secundarios que, según la famosa declaración de Hermann Minkowski, profesor de Einstein en la universidad, “están condenados a desvanecerse en las sombras”.

Las cosas no hicieron sino empeorar con la aparición, en 1915, de la teoría de la relatividad general, la cual extiende la relatividad especial a las situaciones en las que actúa la fuerza de la gravedad. La gravedad distorsiona el tiempo. En consecuencia, el transcurso de un segundo en un lugar no tiene por qué tener el mismo significado que el transcurso de un segundo en otro. Sólo en algunos casos especiales es posible sincronizar los relojes y mantenerlos en hora, pero, en líneas generales, no es posible pensar en un mundo que se despliega poco a poco al toque de un reloj de acuerdo con un único parámetro temporal. En situaciones extremas, el mundo quizá ni siquiera pueda dividirse en instantes de tiempo. Resulta entonces imposible decidir si un suceso ocurrió antes o después de otro.

El formalismo de la relatividad general se encuentra plagado de numerosas funciones matemáticas cuyo nombre incluye la palabra “tiempo”, como tiempo coordenado, tiempo propio o tiempo global. Entre todos llevan a cabo varios de los cometidos del tiempo único de Newton, pero, de manera individual, ninguno de ellos parece merecer tal nombre. O bien la física no se rige por esos relojes, o bien, si lo hace, los mismos sólo se aplican a pequeñas porciones del universo o a observadores particulares. Aunque a los físicos de hoy todavía les inquiete pensar que una teoría unificada prescinda totalmente del tiempo, no está de más recordar que fue en 1915 cuando nos desembarazamos de él. Simplemente, aún no nos hemos hecho del todo a la idea.

El autor

Craig Callender es profesor de filosofía en la Universidad de California en San Diego. Desde su tesis doctoral *Explaining Time's Arrow* (“Explicar la flecha del tiempo”), se ha dedicado al estudio de la filosofía y la física del tiempo. Ha publicado numerosos artículos en revistas de física y de filosofía y ha coordinado varios libros sobre el tiempo y la gravedad cuántica.

El tiempo, el gran narrador

¿Para qué sirve entonces el tiempo? Resultaría tentador pensar que la diferencia entre tiempo y espacio se ha difuminado casi por completo y que, en un universo relativista, el verdadero escenario consiste en un gran bloque de cuatro dimensiones. La relatividad parece hacer del tiempo una mera extensión del espacio, convertirlo en una dirección adicional dentro ese gran bloque. El espaciotiempo vendría a ser como una barra de pan que se puede cortar en rebanadas según diferentes direcciones a las que podemos llamar, de manera casi arbitraria, "tiempo" o "espacio".

Pero también en la teoría de la relatividad el tiempo conserva cierta función particular: la de distinguir localmente entre direcciones de "tipo tiempo" y de "tipo espacio". Dos sucesos *A* y *B* separados espaciotemporalmente por un intervalo de tipo tiempo pueden relacionarse causalmente: un objeto o señal puede viajar de *A* a *B* e influir en lo que allí sucede. En cambio, los sucesos separados por un intervalo de tipo espacio nunca están relacionados causalmente. Ningún objeto o señal (a menos que se propagase a una velocidad mayor que la de la luz) puede llegar del uno al otro. Matemáticamente, la diferencia se reduce a cierto signo menos en las ecuaciones. Pero ese signo acarrea consecuencias enormes. Si dos sucesos quedan separados por un intervalo de tipo espacio, dos observadores no se pondrán de acuerdo en la secuencia de acontecimientos (cuál ocurrió primero y cuál después). Pero todos convendrán en el orden de los sucesos si éstos se hallan separados por un intervalo de tipo tiempo. Si un observador percibe que un suceso puede ser la causa de otro, entonces todos lo verán así.

En mi ensayo para el certamen del FQXi examiné lo que significa esta característica del tiempo. Imaginemos que dividimos el espaciotiempo en secciones que van del pasado al futuro, de modo que cada sección represente la totalidad del espacio tridimensional en cada instante de tiempo. El conjunto de todas esas secciones, cada una de ellas compuesta por sucesos relacionados entre sí de manera espacial, reproduce el espaciotiempo de cuatro dimensiones.

Otra posibilidad, en cambio, consiste en contemplar el mundo "de lado" y seccionarlo según esa dirección, digamos, "de izquierda a derecha" (*véase el recuadro* "Por qué el tiempo no es como el espacio"). Desde esa perspectiva, cada sección corresponde a una extraña amalgama de sucesos que se hallan separados espacialmente en dos dimensiones y temporalmente en otra. Estas dos maneras de seccionar el espaciotiempo serían análogas a cortar una barra de pan en rebanadas horizontales o verticales.

El tiempo es lo que permite la aparición de contradicciones

El primer método les resulta familiar a los físicos, por no hablar de los espectadores de una película cinematográfica. Los fotogramas de una película representan tajadas de espaciotiempo: muestran el espacio en diferentes instantes de tiempo. Y al igual que un espectador atento logra adivinar enseguida la trama de la película y predecir lo que va a ocurrir a continuación, los físicos pueden tomar una porción espacial completa, aplicar las leyes de la física y reconstruir lo que ocurre en las otras porciones espaciales.

Sin embargo, no es posible ofrecer una analogía sencilla para la segunda manera de secuenciar el espaciotiempo ("de izquierda a derecha"). Una de esas secciones podría ser la pared de una casa y lo que acontezca allí en el futuro. A partir de esa porción, podría intentarse lo mismo que en el caso anterior: aplicar las leyes de la física para reconstruir qué pasa en el resto de la casa (o en el resto del universo). Si esto parece extraño es porque realmente lo es. A primera vista, no resulta evidente que las leyes de la física permitan tal reconstrucción. No obstante, Walter Craig, de la Universidad McMaster, y el filósofo Steven Weinstein, de la Universidad de Waterloo, han demostrado que, al menos en algunas situaciones simples, sí que resulta posible.

Aunque en principio ambos métodos para "rebanar" el espaciotiempo son posibles, presentan diferencias de calado. En la secuencia habitual, del pasado al futuro, los datos que han de tomarse en cada sección son bastante fáciles de obtener. Se trata de medir, por ejemplo, las velocidades de todas las partículas en una sección espacial. Y la velocidad de la partícula en cierto lugar es independiente de la velocidad de una partícula en otro, lo que facilita la medición.

Pero en el segundo método las propiedades de las partículas en cada sección no son independientes; deben estar dispuestas de una manera muy particular; de lo contrario, una sola sección no bastará para reconstruir todas las demás a partir de las leyes de la física. Deben llevarse a cabo mediciones extremadamente complicadas de grupos de partículas a fin de recabar los datos necesarios. Y lo que es peor: esas medidas sólo permiten reconstruir el espaciotiempo completo en casos especiales, como el que descubrieron Craig y Weinstein.

En un sentido muy preciso, el tiempo es la dirección del espaciotiempo en la cual se pueden realizar buenas predicciones, la dirección en la cual podemos narrar los relatos más informativos. La narrativa del universo

¿Quién necesita el tiempo?

El tiempo es una manera de describir el ritmo del movimiento o del cambio, tal como la velocidad de una onda luminosa, la rapidez de los latidos del corazón o la frecuencia a la que gira un planeta...

LUZ:
300.000 kilómetros por segundo

CORAZON:
75 latidos por minuto

TIERRA:
1 rotación al día

o bien

1 latido

...pero todos estos procesos pueden relacionarse entre sí sin recurrir al tiempo.

240.000 kilómetros por latido

108.000 latidos por rotación

Puede argumentarse que el tiempo es una “divisa común” que facilita la descripción del mundo, pero que carece de una existencia independiente. Medir los procesos en términos temporales resultaría análogo a utilizar dinero (*izquierda*) en vez del trueque (*derecha*).

2 euros

100 euros

2000 euros

o bien

1 café

50 cafés por un par de zapatos

1000 cafés por un coche de segunda mano

no se despliega en el espacio. Se despliega en el tiempo.

El tiempo en mecánica cuántica

Uno de los objetivos más ambiciosos de la física moderna es unir la relatividad general (la teoría que describe la gravedad) con la mecánica cuántica. Sin embargo, tal unificación ha de superar un escollo fundamental: la mecánica cuántica requiere que el tiempo posea propiedades que contradicen lo que hemos dicho hasta aquí.

La mecánica cuántica afirma que los objetos tienen un repertorio de comportamientos mucho más rico de lo que nos es posible apreciar con cantidades clásicas como la posición y la velocidad. La descripción completa de un objeto viene dada por una función matemática: su estado cuántico. El estado cuántico de un sistema evoluciona continuamente en el tiempo. A partir de él, resulta posible calcular las probabilidades de obtener cualquier resultado experimental en cualquier instante. Si se envía un electrón a través de un dispositivo que lo deflectará hacia arriba o hacia abajo, en general, la mecánica cuántica no es capaz de indicarnos exactamente qué resultado obtendremos. El estado cuántico nos proporciona sólo las probabilidades de medir alguno de los resultados posibles; digamos, una probabilidad del 25 por ciento de que el electrón tuerza su camino hacia arriba y un 75 por ciento de que se desvíe hacia abajo. Dos experimentos realizados con dos sistemas descritos por el mismo estado cuántico (es decir, dos experimentos idénticos) pueden arrojar resultados distintos, ya que los resultados se expresan sólo mediante probabilidades.

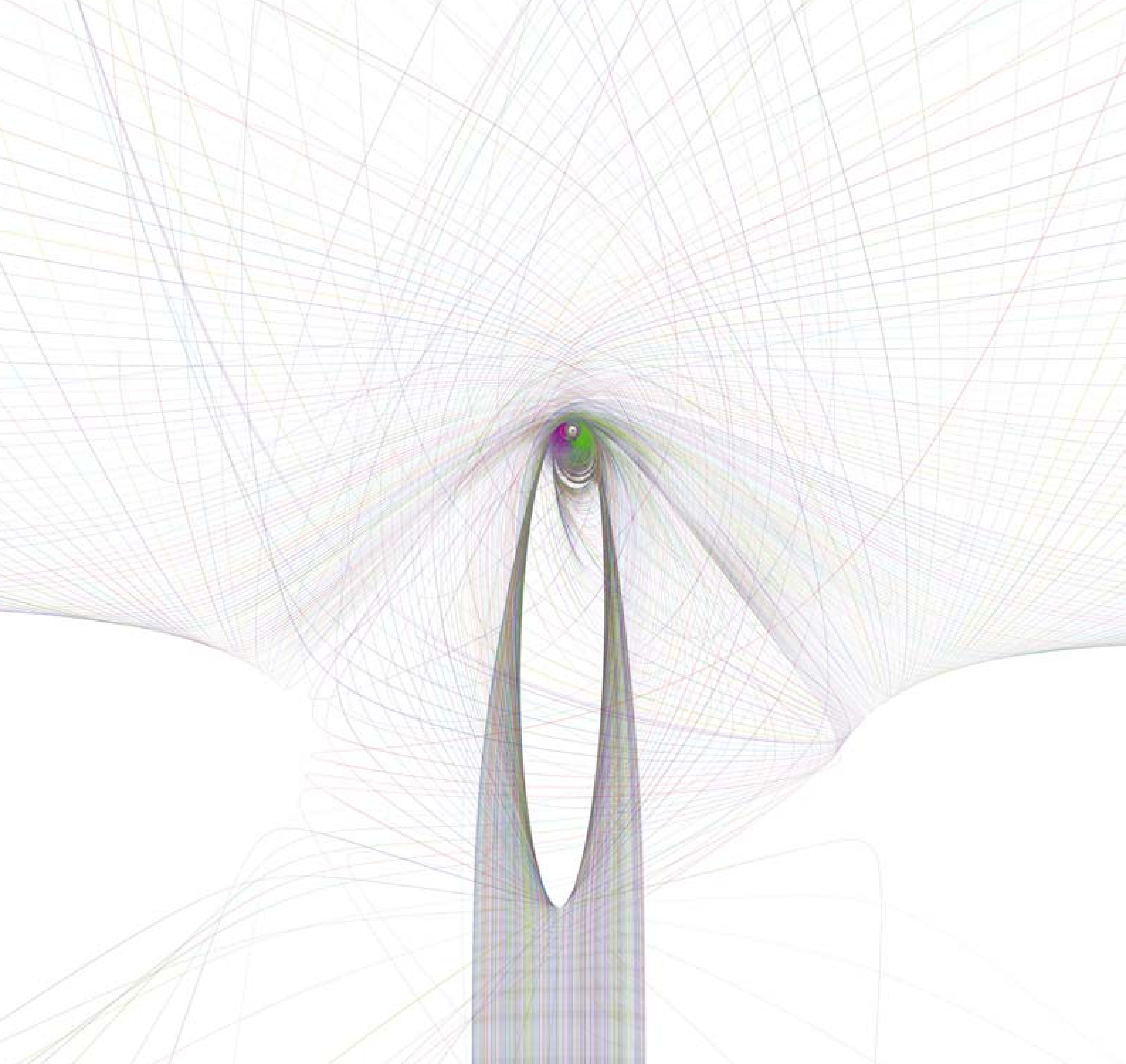
Las predicciones probabilísticas de la teoría exigen del tiempo ciertas propiedades. En primer lugar, es el tiempo lo que permite la aparición de contradicciones. Al tirar un dado, no podemos obtener un 3 y un 5 a la vez; dos números distintos sólo pueden aparecer en instantes diferentes. Asociado a esta propiedad está el hecho de que, en cada instante, las probabilidades de obtener cada uno de los seis números deben sumar 100 por ciento; de otro modo, el concepto de probabilidad carecería de sentido. Y las probabilidades se suman en un mismo momento, no en un lugar. Lo mismo cabe decir sobre las probabilidades de que una partícula tenga una posición o una cantidad de movimiento dadas.

En segundo lugar, el orden temporal de las mediciones cuánticas sí que importa. Su-

MELISSA THOMAS

ADALIDES DEL FLUJO DEL TIEMPO

No todos los físicos creen que el universo carezca de tiempo. Una de las ideas alternativas más intrigantes es la teoría de conjuntos causales, elaborada por Rafael Sorkin y David Rideout, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario. Suponen que el mundo es un conjunto de sucesos (un *causet*) que crece a medida que nuevos sucesos ven la luz de acuerdo con reglas probabilísticas. La esperanza es que un proceso tal reproduzca las características del espaciotiempo que percibimos, incluyendo el flujo del tiempo. Sin embargo, una cuestión pendiente es si una dinámica de ese estilo lograría dar lugar a mundos compatibles con la teoría de la relatividad.



KEITH PETERS

2. UN ENTRAMADO DE RELACIONES. Es posible que el tiempo no posea una existencia independiente, sino que surja como un modo de describir las relaciones entre objetos. Keith Peters se inspiró en esta idea a la hora de componer esta obra a base de conjuntos de líneas entrelazados sucesivamente.

pongamos que hacemos pasar un electrón a través de un dispositivo que lo deflecte primero según la dirección vertical y después según la horizontal. A la salida, medimos su momento angular. Si repetimos el experimento de manera que la deflexión horizontal preceda a la vertical, el resultado del momento angular será completamente distinto.

En tercer lugar, un estado cuántico proporciona las probabilidades para todo el espacio en un instante dado. Si un sistema cuántico incluye un par de partículas, las mediciones sobre una partícula afectan instantáneamente a la otra, con independencia de dónde se encuentre. Ello da lugar a la "espeluznante acción a distancia" de la mecánica cuántica que tanto preocupaba a Einstein. Su inquietud se debía a que, para que las partículas reaccionaran al mismo tiempo, el universo debía poseer un reloj patrón, algo expresamente prohibido por la teoría de la relatividad [*véase* "El principio de localidad", por David Z. Albert y Rivka Galchen; Investigación y Ciencia, mayo de 2009].

Si bien algunos aspectos resultan controvertidos, el tiempo en mecánica cuántica es, en esencia, un regreso hacia el concepto de tiempo en la mecánica de Newton. La ausencia de tiempo en la teoría de la relatividad

es inquietante, pero quizá sea más grave el cometido central del tiempo en la mecánica cuántica. Esa es la razón profunda por la que una unificación se muestra tan difícil.

¿Qué fue del tiempo?

Un gran número de líneas de investigación han intentado reconciliar la relatividad general y la mecánica cuántica: la teoría de supercuerdas, la teoría de triangulación causal, la geometría no conmutativa y otras. Se dividen en dos grandes grupos. Quienes piensan que la mecánica cuántica proporciona unos cimientos más sólidos (como los teóricos de supercuerdas) comienzan con un tiempo con todas las de la ley. Los que creen que la relatividad general constituye el mejor punto de partida comienzan con una teoría en la que el concepto de tiempo ya está degradado; éstos son, por tanto, más proclives a aceptar la idea de una realidad carente de tiempo.

A decir verdad, la distinción entre estos dos enfoques es imprecisa (los teóricos de supercuerdas han investigado recientemente teorías en las que el espaciotiempo surge como un concepto secundario, no fundamental). Pero, para tratar de exponer el problema básico que plantea el tiempo, nos centraremos aquí en el segundo enfoque. El principal exponente de dicha estrategia lo representa la "gravedad cuántica de bucles" [*véase* "Atomos del espacio y del tiempo", por Lee Smolin; Investigación y Ciencia, marzo de 2004], la cual proviene de otro intento previo de afrontar el problema: la cuantización canónica de la gravedad.

La cuantización canónica de la gravedad apareció en los años cincuenta y sesenta. La idea consistía en reescribir las ecuaciones de la gravitación de Einstein en la misma forma que las ecuaciones del electromagnetismo, con la esperanza de que las técnicas empleadas para formular una teoría cuántica del electromagnetismo pudieran aplicarse también a la gravedad. Cuando John Wheeler y Bryce DeWitt lo intentaron, a finales del decenio de los sesenta, llegaron a un extraño resultado: la ecuación que obtuvieron (hoy conocida como "ecuación de Wheeler-DeWitt") carecía completamente de variable temporal. El símbolo t que suele representar el tiempo sencillamente había desaparecido.

Siguieron varios decenios de consternación entre los físicos. ¿Cómo podía el tiempo desaparecer de esa manera? Pero si volvemos la vista atrás, el resultado no se muestra tan sorprendente. Como ya mencionamos, el tiempo ya había desaparecido casi por completo de la relatividad general, incluso antes de que los físicos intentaran combinarla con la mecánica cuántica.

Al pie de la letra, el resultado implica que el tiempo en realidad no existe. Carlo Rovelli, de la Universidad del Mediterráneo en Marsella, uno de los fundadores de la gravedad cuántica de bucles, tituló su ensayo para el FQXi *Forget Time* ("Olvida el tiempo"). Rovelli y el físico británico Julian Barbour son los más destacados proponentes de esta idea. Han intentado reescribir la mecánica cuántica de forma que en ella no intervenga el tiempo, tal como parece requerir la relatividad.

La razón por la que piensan que tal estratagema es posible se basa en que, aunque la relatividad general carece de un tiempo universal, consigue de todos modos describir el cambio. Para ello, relaciona directamente distintos sistemas físicos sin recurrir a una noción abstracta de tiempo universal. En los experimentos mentales de Einstein, los observadores establecen la localización temporal de los sucesos mediante la comparación de relojes, empleando para ello señales luminosas. La variación de la posición de un satélite alrededor de la Tierra puede describirse al compás que marca el reloj de nuestra cocina, o viceversa. Lo que hacemos no es sino describir las correlaciones entre dos objetos y eliminar cualquier tiempo global como intermediario. En vez de describir cómo cambia el color de nuestro cabello conforme pasa el tiempo, es posible correlacionarlo con la órbita del satélite. En lugar de indicar que una pelota de tenis aumenta su velocidad en 10 metros por segundo cada segundo, lo podemos describir en comparación con los cambios de un glaciar. El tiempo es redundante. Es factible describir el cambio sin recurrir a él.

Esta vasta red de correlaciones está impecablemente organizada, por lo que una posibilidad se basa en definir algo llamado "tiempo", relacionar todo con él y aliviarnos así del peso de llevar la cuenta de todas esas relaciones directas. La física logra resumir de manera compacta el funcionamiento del universo en términos de leyes físicas que operan en el tiempo. Pero que esto resulte práctico no debería engañarnos y hacernos pensar que el tiempo es una parte fundamental del armazón del universo. También el dinero nos hace la vida mucho más fácil al evitarnos la obligación de concertar un trueque cada vez que queremos tomarnos un café. Pero se trata de un símbolo artificial, aplicable a las cosas que se pueden comprar o vender, no algo que tenga valor en sí mismo. Del mismo modo, el tiempo nos permite relacionar los sistemas físicos entre sí sin necesidad de resolver las relaciones precisas entre el comportamiento de una pelota de tenis y el de un glaciar. Pero constituye una ficción útil,

El tiempo es redundante. Podemos describir el cambio sin recurrir a él.

sin una existencia más sustancial que la que pueda poseer el dinero.

Liberarse del tiempo tiene su atractivo, pero también inflige graves daños colaterales. Por un lado, requiere una completa reformulación de la mecánica cuántica. Consideremos el famoso gato de Schrödinger. El gato se halla entre la vida y la muerte, y su sino depende del estado de una partícula cuántica. Según la interpretación usual, el gato acabará vivo o muerto una vez llevemos a cabo una medición sobre su estado u otro procedimiento equivalente. Rovelli, sin embargo, argumentaría que el estado del gato nunca queda decidido. El pobre animal podría estar muerto con respecto a sí mismo, vivo respecto a una persona en la habitación, muerto por lo que se refiere a alguien ajeno a la sala, etcétera.

Una cosa es establecer que el instante de la muerte del gato dependa del observador, como hace la relatividad especial. Pero otra mucho más sorprendente es relativizar el hecho mismo de que el gato viva o muera, como sugiere Rovelli, quien con ello estira el espíritu de la teoría de la relatividad tanto como pueda dar de sí. La noción de tiempo es tan básica que eliminarla transformaría radicalmente la manera en que se percibe el mundo desde las leyes de la física.

Rescatar el tiempo

Aunque, desde un punto de vista fundamental, el mundo carezca de tiempo, lo cierto es que nosotros percibimos su existencia como algo real. Una cuestión apremiante para cualquier teoría cuántica de la gravedad carente de tiempo es explicar por qué el mundo adopta una apariencia temporal. También la relatividad general se deshizo del tiempo newtoniano, pero, al menos, contaba con varios sustitutos parciales que, en conjunto, operaban a la manera del tiempo newtoniano en condiciones de gravedad débil y velocidades relativas pequeñas. La ecuación de Wheeler-DeWitt carece incluso de esos sustitutos. Barbour y Rovelli han ofrecido sus respectivas sugerencias sobre la manera en que el tiempo (o, al menos, la quimera del tiempo) podría brotar de la nada. Pero la cuantización canónica de la gravedad brinda una noción más elaborada: el "tiempo semiclásico".

El concepto data de un artículo de 1931 en el que Nevill F. Mott describía la colisión entre un núcleo de helio y un átomo de mayor tamaño. Para modelizar el sistema, Mott utilizó una ecuación que carece de tiempo y que, por lo general, se aplica sólo a situaciones estáticas. Dividió el conjunto en dos subsistemas y empleó el núcleo de helio a modo de "reloj" para el átomo. Lo asombroso es que, con relación al núcleo, el átomo obedece la ecuación habitual dependiente del tiempo de la mecánica cuántica. Una función del espacio asume el cometido del tiempo. De modo que, aunque el sistema en su conjunto carece de tiempo, ello no ocurre con cada parte individual. En la ecuación sin tiempo para el sistema total se esconde el tiempo del subsistema.

Algo muy parecido funciona en gravedad cuántica, tal y como sostenía en su ensayo para el FQXi Claus Kiefer, de la Universidad de Colonia, de acuerdo con los postulados de Thomas Banks, de la Universidad de California en Santa Cruz, y otros expertos. Puede que el tiempo no exista. Pero, si nos imaginamos el universo descompuesto en varias partes, algunos de esos fragmentos sirven de relojes para otros. El tiempo surge de lo atemporal. Percibimos el tiempo porque somos, por nuestra misma naturaleza, uno de esos pedazos.

Por interesante y sorprendente que resulte, la idea nos deja con la miel en los labios. El universo no siempre admite una división en partes que sirvan como relojes y, en tales casos, la teoría no realiza predicciones probabilísticas. Para manejar esas situaciones será necesario elaborar una teoría cuántica completa de la gravedad y volver a reflexionar con detenimiento sobre el tiempo.

Históricamente, la física comenzó con una noción de tiempo altamente estructurada: el tiempo de pasado fijo, presente y futuro abierto que nos brinda la experiencia cotidiana. Gradualmente, esa estructura se ha ido desmantelando y poco queda ya en pie. Ahora, nos vemos en la tesitura de recorrer el camino inverso: reconstruir el tiempo de la experiencia a partir del tiempo de una física no fundamental, que, a su vez, quizá necesitemos derivar a partir de una red de correlaciones entre los fragmentos de un mundo fundamentalmente estático.

El filósofo francés Maurice Merleau-Ponty sostenía que, en realidad, el tiempo no fluye y que su flujo aparente es el producto de haber "colocado subrepticiamente en el río a un testigo de su curso". Es decir, la tendencia a creer que el tiempo fluye sobreviene porque olvidamos ponernos en el escenario a nosotros mismos y a nuestras conexiones con el mundo. Merleau-Ponty hablaba de nuestra experiencia subjetiva del tiempo. Hasta hace poco, nadie imaginaba siquiera que el tiempo objetivo pudiera explicarse como resultado de esas conexiones. Puede que el tiempo aparezca únicamente tras descomponer el mundo en subsistemas y observar qué es lo que los mantiene unidos. Según esta idea, el tiempo físico surgiría en virtud de concebirnos a nosotros mismos como algo separado del resto de las cosas.

Bibliografía complementaria

RELATIONAL QUANTUM MECHANICS. Carlo Rovelli en *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 35, n.º 8, págs. 1637-1678; agosto de 1996.

CAN PHYSICS COHERENTLY DENY THE REALITY OF TIME? Richard Healey en *Time, Reality & Experience*. Dirigido por Craig Callender. Universidad de Cambridge, 2002.

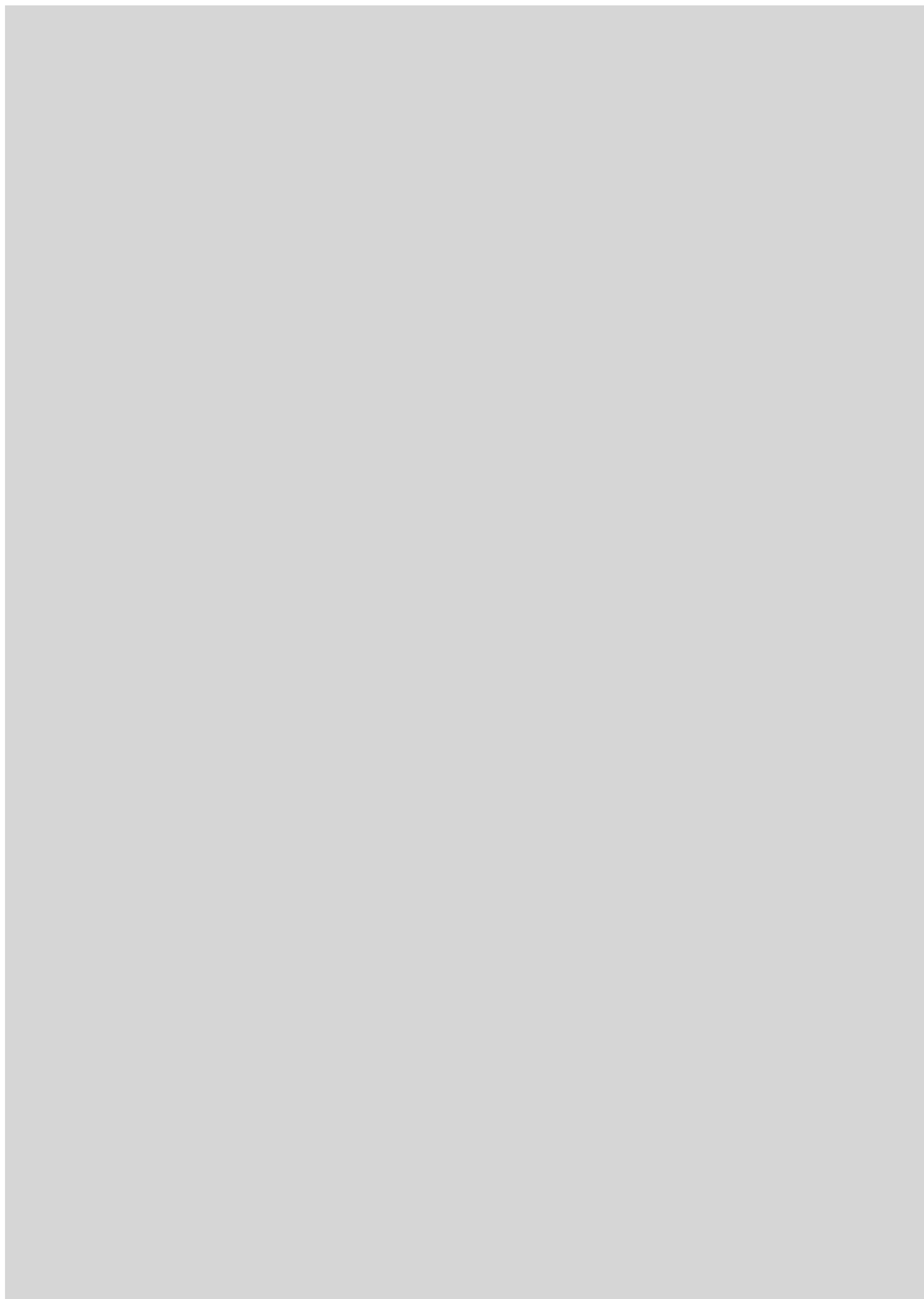
THREE ROADS TO QUANTUM GRAVITY. Lee Smolin. Basic Books, 2002.

THE FABRIC OF THE COSMOS: SPACE, TIME AND THE TEXTURE OF REALITY. Brian Greene. Vintage, 2005.

INTRODUCING TIME. Craig Callender. Totem Books, 2005.

THE COMPLETE IDIOT'S GUIDE TO STRING THEORY. George Musser. Alpha, 2008.

FROM ETERNITY TO HERE: THE QUEST FOR THE ULTIMATE THEORY OF TIME. Sean M. Carroll. Dutton, 2010.



Swala Tommy

Anna Gili, Mercè Rodríguez y Josep-Maria Gili

Swala (gacela en suajili) de Thomson (*Gazella thomsoni*), denominada también “tommy”, es la gacela más abundante y conocida del Africa oriental. Lleva el nombre del geólogo y explorador escocés Joseph Thomson. Se trata de un antílope de mediano tamaño, de unos 60 centímetros de altura y unos 30 kilogramos de peso, que habita exclusivamente la sabana de la región que comprende los territorios de Kenia, Tanzania, Etiopía y Sudán. Se caracteriza por una franja lateral horizontal de pelaje oscuro que resalta sobre el dorso de color marrón rojizo. Los machos presentan cuernos anillados y largos; las hembras, en cambio, exhiben cuernos de menor tamaño, muchas veces fracturados como consecuencia de las peleas que mantienen con otros miembros por el espacio de alimentación. La especie ocupa territorios de unas 200 hectáreas. Posee una gran agudeza visual y auditiva. Entre sus características destaca la velocidad: alcanza los 80 kilómetros por hora, con saltos de entre tres y ocho metros de longitud, hecho que le permite escapar de sus depredadores. Llega a vivir unos 20 años, y una hembra puede reproducirse dos veces al año. Son animales muy silenciosos, con patas largas y muy finas. Se trata de una especie territorial: marca el territorio mediante las secreciones de unas glándulas que posee en las patas y en la cara o mediante los excrementos.

1. IMAGEN DE LA SABANA AFRICANA, donde se concentran centenares de individuos de la gacela de Thomson. En el Africa oriental se han censado unos 500.000 ejemplares.

ANNA GILI, MERCÈ RODRÍGUEZ Y JOSEP-MARIA GILI

2. HEMBRA JOVEN Y CRIA. Las hembras paren una sola cría después de unos seis meses de gestación. Se apartan de la manada para amamantarla y regresan a las cuatro semanas, una vez la cría ya puede correr.





3. *G. THOMSONI* se alimenta de hojas y hierba, de las que extrae además gran parte del agua que necesita.



4. *GAZELLA THOMSONI* vive en manadas de unas decenas de individuos, con una hembra dominante y un solo macho. Es una especie muy social; comparte la manada con otras especies, como la *Gazella granti* y otros antílopes.





5. VIVEN SIEMPRE en estado de alerta ya que presentan, sobre todo las crías, una gran variedad de depredadores: guepardos, leones, hienas, perros salvajes, chacales y leopardos, entre otros.

Limpiar DE CARBONO EL AIRE

La absorción del dióxido de carbono de la atmósfera por medios mecánicos contribuiría a frenar su acumulación y reduciría el calentamiento global

Klaus S. Lackner

No podemos permitirnos arrojar más dióxido de carbono a la atmósfera. Sin embargo, las emisiones no aminoran. Todo apunta a que la concentración de CO_2 seguirá en ascenso en los próximos decenios. Pese al notable aliento prestado a las energías renovables, a buen seguro los países desarrollados y en fase de desarrollo continuarán consumiendo petróleo, carbón y gas natural.

En el sector del transporte, sobre todo, no se ven alternativas fáciles al petróleo. Almacenar en un vehículo la energía eléctrica necesaria entraña dificultades. A igualdad de masa, las baterías acumulan menos del uno por ciento de la energía que proporciona la gasolina. Transportar hidrógeno en un vehículo exige un espacio de almacenamiento diez veces mayor que el necesario para la gasolina y, además, el tanque que lo contiene es muy pesado. Aunque se han realizado vuelos experimentales con aviones propulsados por biocombustibles, no está claro que éstos puedan obtenerse en las cantidades y los precios que requieren las aerolíneas, y tal vez las compañías navieras.

¿Cómo impedir, pues, que la concentración de CO_2 siga en ascenso desde su actual nivel de 389 partes por millón? A menos que se prohíban los combustibles de origen carbónico, una solución consistiría en extraer el CO_2 del aire. Parte del gas podría absorberse si se permitiera la extensión de la superficie forestal. Pero la cantidad de CO_2 producida por la humanidad es tal, que la superficie terrestre disponible no bastaría para capturarlo en cantidad suficiente. Por suerte, existen máquinas de filtrado (una suerte de árboles sintéticos) con capacidad de absorber más CO_2 que los árboles naturales de tamaño similar.

Varios grupos de investigadores trabajan con máquinas prototipo: en el Instituto de Tecnología de Georgia, la Universidad de Calgary en Canadá, el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Zúrich y los que dirige el autor en la Universidad de Columbia y Global Research Technologies (Tucson), entre otros (*véase el recuadro* "Procesos que compiten"). Todos los diseños constituyen variaciones sobre un mismo principio: la corriente de aire que atraviesa una estructura entra en contacto con un material "sorbente" que fija CO_2 y libera oxígeno, nitrógeno y otros compuestos.

Para mitigar el cambio climático habría que capturar el dióxido de carbono a gran escala. El concepto básico de ese procedimiento está bien establecido. Desde hace decenios se purifica de



JOE ZEFF DESIGN

CO_2 el aire exhalado en los submarinos y las naves espaciales, así como el que se utiliza en la producción de nitrógeno líquido. La depuración se realiza mediante diversos procesos químicos, pero las máquinas de sorbentes sólidos extraen el mayor volumen de gas en relación con la energía consumida. Los primeros prototipos, de tamaño reducido, permiten pensar que podría detenerse, e incluso invertirse, el aumento del CO_2 atmosférico.

Un filtro enorme

Como sucede en los vegetales, las máquinas purificadoras de aire se presentan en diversas formas y tamaños. Cada unidad de demostración (etapa siguiente a los prototipos de laboratorio) debería capturar de una a cientos de toneladas de CO_2 al día. El diseño desarrollado por Columbia y Global Research Technologies ofrece un ejemplo del funcionamiento de la técnica. Unas delgadas fibras de material sorbente se disponen en paneles verticales, grandes y lisos, de 1 metro de ancho y 2,5 metros de alto, semejantes a filtros de horno. Los paneles de filtrado recorren un raíl circular, horizontal, montado sobre un contenedor marítimo, de 12,2 metros de largo (*véase el recuadro* "El carrusel del carbono"). Una vez expuestos al aire y cargados de CO_2, los paneles se desmontan del raíl y pasan a una cámara de regeneración en el interior del contenedor. Allí, el gas atrapado se separa del sorbente y se comprime hasta alcanzar la fase sólida. El panel renovado se eleva de nuevo hasta el raíl donde seguirá extrayendo gas de la corriente de aire.

El CO_2 absorbido por las máquinas tendría un uso lucrativo en la industria; también se podría introducir en el subsuelo mediante conductos, como en los sistemas experimentales de captura y almacenamiento de carbono que se intentan aplicar en las centrales de carbón. Una posibilidad atrayente sería aprovechar el gas como materia prima para la producción de combustibles líquidos sintéticos para el transporte. Mediante energía eléctrica se puede separar un átomo de oxígeno de las moléculas de CO_2 y agua (H_2O), respectivamente. La mezcla resultante de CO y H_2, el gas de síntesis, se utiliza desde hace casi un siglo para producir combustibles y plásticos. La compañía sudafricana Sasol lleva años fabricando gasolina y diésel sintéticos a partir del gas de síntesis obtenido del carbón. Capturar CO_2 del aire permitiría compensar las emisiones de los vehículos propulsados por combustibles

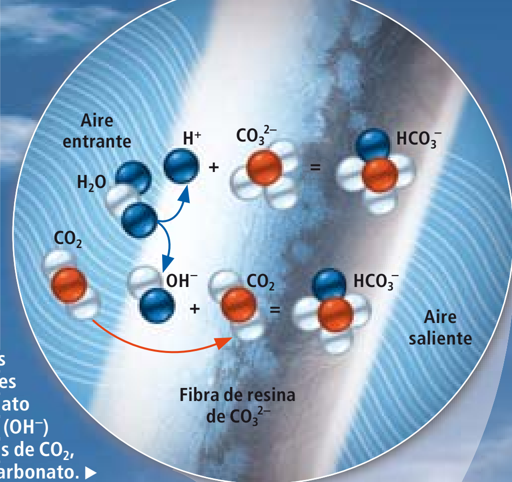
CONCEPTOS BASICOS

- Es posible extraer dióxido de carbono del aire mediante máquinas equipadas con filtros de materiales sorbentes en los que se fija el gas.
- En la producción masiva, esas máquinas permitirían obtener CO_2 a un coste de 24 euros por tonelada, bastante inferior al del suministro comercial de CO_2, de unos 80 euros por tonelada.
- Unos 10 millones de esas máquinas repartidas por todo el planeta, con sorbentes mejorados, reducirían la concentración de CO_2 en cinco partes por millón al año, a un ritmo más rápido que la acumulación actual del gas en la atmósfera.

EL CARRUSEL DEL CARBONO

En el proyecto de Global Research Technologies, el aire atraviesa unos filtros de resina que van girando lentamente, guiados por un raíl, y absorben CO_2 (*inserto*). Cuando un filtro está cargado, un montacargas lo hace descender a un contenedor de transporte. Allí se transfiere a una de las seis cámaras de regeneración en las que se extrae el CO_2 (*paneles inferiores*). El montacargas vuelve luego a colgar el filtro limpio en el raíl y se reinicia la captura de CO_2.

La captura se produce cuando el aire fluye a través de las fibras recubiertas por aniones carbonato (CO_3^{2-}), que atraen a hidrogeniones (H^+) procedentes de moléculas de agua residuales (H_2O) para formar un bicarbonato (HCO_3^-). Los iones hidroxilo (OH^-) restantes atrapan moléculas de CO_2, y se forma también bicarbonato. ▶



Montacargas

Filtro cargado con CO_2

Filtro limpio

Cámara de regeneración

Filtro cargado

Compresor

Depósito de agua

Depósito de CO_2

Sumidero









La limpieza de un filtro comienza por la evacuación de aire (1). Se pulveriza luego agua para disolver el bicarbonato de las fibras, que revierte a carbonato y a CO_2 (2). El CO_2 se evacua y comprime hasta el estado líquido, para almacenarlo o usarlo en la industria (3). El agua se recoge a través de un sumidero (4).

fósiles, o bien contribuiría a reemplazar esos combustibles por líquidos sintéticos que no requieren la extracción de carbón, petróleo o gas natural.

Por supuesto, no basta con que la captura de aire sea químicamente viable; además ha de ser factible, rentable y eficaz en términos energéticos. Para extraer el CO_2 del aire se necesita un equipo compacto. A través de una abertura del tamaño de una puerta, a una altitud en la que el aire circule a seis metros por segundo (velocidad normal en los parques eólicos), fluyen más de 700 kilogramos de CO_2 al día. Esa cantidad equivale al CO_2 que producen 13 personas en EE.UU. durante el mismo período. Aunque el viento no sea siempre tan rápido, el filtrado reduzca el flujo y la captura íntegra del gas sea improbable, los colectores siguen siendo compactos.

Al evaluar el coste, se han de considerar dos etapas básicas: la extracción de CO_2 del aire y la recuperación del carbono adherido al sorbente. Tras comparar la técnica con los aerogeneradores, pronto llegamos a la conclusión de que el coste de filtrar el aire a través de un sorbente sería pequeño. No así la operación siguiente, la liberación del CO_2 absorbido, que representa la mayor parte de los gastos del proceso total. No obstante, la captura de aire constituye una opción más práctica que la depuración de las emisiones de millones de tubos de escape; ello exigiría almacenar un gran volumen de CO_2 en cada vehículo y devolverlo a un punto colector (la combustión de un kilogramo de gasolina en un motor produce tres kilogramos de CO_2). Resulta más viable purificar el aire ambiente.

Sorbente seco o húmedo

Desde una perspectiva química, el sorbente tiene que fijar el CO_2 con una fuerza suficiente para captar el gas, pero no tan intensa que encarezca la subsiguiente liberación del gas para su almacenamiento. En el aire ambiente, la concentración de CO_2 ronda el 0,04 por ciento; en el humo de las chimeneas de una central de carbón, se sitúa entre el 10 y el 15 por ciento. Pero el poder de absorción necesario varía muy poco con la concentración de dióxido de carbono del entorno; por ello, los sorbentes para la captura de aire pueden tener una capacidad de absorción similar a los que purifican los humos de chimeneas.

Existen sorbentes sólidos y líquidos. El atractivo de los líquidos radica en la facilidad del transvase entre el colector y el regenerador. Lo difícil es mantener una buena exposición de la superficie del líquido a la atmósfera, pero la ingeniería química ha sabido resolver el problema. David Keith, de la Universidad de Calgary y la empresa emergente Carbon Engineering, pulveriza una solución de hidróxido sódico sobre un lecho de superficies plásticas, a través del cual se impulsa aire mediante un ventilador. Aunque resulta fácil desplazar el líquido, no lo es tanto separar el CO_2 del sorbente debido a su firme adhesión al hidróxido sódico.

Los sorbentes sólidos presentan la ventaja de admitir superficies rugosas, donde se puede fijar un mayor número de moléculas de CO_2, con lo que se eleva el índice de captación del gas. Su transvase hacia y desde la cámara de regeneración resulta, sin embargo, más engorroso que en los líquidos. Global Thermostat, asociación comercial basada en los trabajos del Instituto de Tecnología de Georgia, investiga unos sorbentes sólidos que se someten al calor para liberar el CO_2 que han atrapado.

Tanto los sorbentes sólidos como los líquidos se sirven de la reacción química del dióxido de carbono (un ácido) con distintos sorbentes (en su mayoría, bases); en esta reacción se obtiene una sal. Tal es el caso del hidróxido sódico (sosa cáustica), un poderoso sorbente que se une al dióxido de carbono para formar carbonato sódico (sosa comercial). El carbonato, todavía de carácter básico, continúa absorbiendo dióxido de carbono y se transforma en bicarbonato sódico, asimismo básico. Otros sorbentes participan en procesos químicos similares.

En principio, debería ser posible extraer CO_2 de un bicarbonato y devolver el sorbente a su estado de hidróxido para seguir así reciclándolo. Pero en la práctica, los métodos de regeneración parecen sólo eficaces en una mitad del ciclo: o bien separan el CO_2 de un bicarbonato para obtener un carbonato, o bien separan el CO_2 del carbonato para obtener hidróxido. Es preferible pasar de bicarbonato a carbonato una y otra vez, porque se requiere menos energía para liberar el CO_2 una vez éste se ha adherido al sorbente.

Existen varias clases de sorbentes innovadores que pueden pasar del estado de carbonato a bicarbonato, y viceversa. Una de ellas la forman las resinas de intercambio de aniones. Esos polímeros de carbonato de apariencia plástica se emplean en diversos procesos químicos, como la preparación de agua desionizada. Los cationes de la resina mantienen posiciones fijas, mientras que los aniones son móviles. Los aniones pueden sustituirse por otros lavando la resina con una solución que aporte aniones diferentes.

Global Research Technologies ha preparado una resina de ese género. Con la resina seca se construyen filtros, que se exponen al viento. La resina se carga de dióxido de carbono hasta al-

UN PLAN PLANETARIO

Para desacelerar el calentamiento global:

10 millones
de máquinas de captura en todo el mundo.

10 toneladas
de CO_2 extraídas del aire por cada máquina y día, tras descontar las emisiones relativas a la energía consumida por las máquinas.

36 gigatoneladas
de CO_2 capturadas por año en el mundo.

5 partes por millón
de CO_2 menos al año en la atmósfera terrestre, hoy día de 389 ppm y en aumento.

El autor

Klaus S. Lackner, profesor de geofísica, dirige el departamento de ingeniería de la Tierra y el medio ambiente en la Universidad de Columbia. Es además miembro del Instituto de la Tierra y cofundador de Global Research Technologies, compañía creada para experimentar las técnicas de captura de aire.

KEVIN HAND

LA VENTA DE CO_2

El dióxido de carbono atrapado del aire se podría introducir e inmovilizar bajo tierra, o bien venderse como agente activo o materia prima para industrias actuales y futuras.

APLICACIONES EXISTENTES

- Agente potenciador de la extracción de crudo por bombeo en campos petrolíferos.
- Gasificación de refrescos.
- Congelante para carne de aves.

APLICACIONES FUTURAS

- Materia prima para fabricar gasolina sintética.
- Sustancia nutritiva para granjas de algas que produzcan biocombustibles.
- Materia prima para cementos carbonatados.


EXTRACCION DE CRUDO

canzar el estado de bicarbonato. Al humedecer la resina, ésta libera el CO_2 atrapado y regresa al estado de carbonato. Una vez seca, puede volver a absorber dióxido de carbono.

En el sistema que nuestro grupo proyectó, el filtro cargado desciende hasta una cámara de regeneración alojada dentro del contenedor de transporte. Se evacua el aire, y después se añade agua, quizá pulverizada. La resina húmeda libera el CO_2, que se bombea al exterior y se comprime hasta el estado líquido. La compresión provoca asimismo la condensación del vapor de agua residual en agua pura, la cual se retira y se reutiliza. El filtro, una vez limpio, se alza por encima de la cámara de regeneración para secarlo, tras lo cual se reanuda la absorción de dióxido de carbono sobre el contenedor de transporte.

El consumo de energía se produce principalmente en dos etapas. La primera es la evacuación de aire desde la cámara de regeneración. La segunda, que exige mucha más energía, consiste en la compresión del gas CO_2 desde una fracción de atmósfera hasta la presión necesaria para su licuefacción (varias decenas de atmósferas, dependiendo de la temperatura). Según nuestro diseño, en el proceso de recogida de 1,0 kilogramo de CO_2 se consume 1,1 megajoule de energía eléctrica. A efectos comparativos, las plantas eléctricas que generan 1,1 megajoule emiten un promedio de 0,21 kilogramos de dióxido de carbono. Por consiguiente, el proceso de captura de aire recoge mucho más CO_2 que el desprendido durante el consumo de energía.

El coste real de la energía necesaria ronda los 11,5 euros por tonelada de dióxido de carbono absorbido del aire, valor no muy superior al que supondría extraerlo de un conducto de humos. Ahora mismo, sin embargo, la mayor parte del gasto de instalación de estas unidades se invertiría en su fabricación y mantenimiento, costes que disminuirían si aumentaran las cifras de producción. Cabe esperar que el coste inicial de la captura de aire se acerque a 160 euros por tonelada de dióxido de carbono, y que los precios desciendan notablemente a medida que se construyan más colectores.

Almacenamiento y aplicaciones

Además de almacenarlo, hay que pensar en aprovechar el CO_2 recogido. Ciertas opciones son evidentes.

El dióxido de carbono presenta numerosas aplicaciones industriales, desde las bebidas carbónicas hasta los alimentos congelados y la fabricación de hielo seco. El gas se utiliza además para estimular el crecimiento de cultivos de interior, y como disolvente o refrigerante que no contamina. Los centros de producción industrial no abundan, y por tanto son los costes de envío los que gobiernan el precio. En EE.UU., el CO_2 suele venderse a más de 80 euros la tonelada. Pero en lugares remotos, el precio se duplica o triplica. El mercado mundial se aproxima a los 30 millones de toneladas de CO_2 al año, parte del cual podría ser abastecido por unidades de captura de aire.

Ciertos nichos de mercado, como el alimentario, podrían ofrecer puntos de apoyo. A medida que se fabriquen más unidades de captura, los precios descenderán y el mercado se expandirá. Cuando el precio de la tonelada de CO_2 atrapado haya caído por debajo de los 80 euros, la extracción podría también venderse como un derecho de emisión de carbono, a semejanza de los que se negocian en la Bolsa del carbono en Londres.

Los mercados emergentes fomentarían el establecimiento de la técnica. Desde los años setenta, las compañías petroleras compran CO_2 para mejorar la extracción; el gas bombeado a presión en el subsuelo permite obtener más crudo o gas natural de campos de producción menguante. Si el CO_2 se hubiera recogido de


GRANJA DE ALGAS


CEMENTO

No hablamos de geoingeniería

Algunos consideran la extracción del dióxido de carbono del aire como geoingeniería. No coincido con tal opinión. La técnica que proponemos no cambia la dinámica natural de la Tierra ni crea riesgo ambiental alguno, a diferencia de los métodos de geoingeniería. Emitir aerosoles a la atmósfera superior para absorber luz solar altera la composición química atmosférica y el equilibrio de radiaciones a través del planeta. Cuando se esparcen partículas de hierro sobre la superficie del océano para acelerar el crecimiento de las algas que absorben CO_2, la química y la biología marinas se modifican. La captura de CO_2 en la atmósfera simplemente retira el exceso de ese gas arrojado por los humanos.

la atmósfera, las compañías podrían solicitar un derecho de emisión (bono) de carbono por el gas introducido bajo tierra; la mitad del gas inyectado suele mantenerse allí de manera natural. La extracción asistida del crudo ofrece un enorme mercado potencial. Pero en muchos casos, los campos petrolíferos se encuentran lejos de las fuentes de CO_2, lo que podría remediarse si se instalaran unidades de captura contiguas al campo.

No obstante, con la aparición de fuentes de energía limpia, la ventaja de la captura de aire estribará en la producción de combustible líquido a partir del CO_2 recuperado. Como ya se ha señalado, la electrólisis y las reacciones reversibles agua-gas permiten obtener gas de síntesis a partir de CO_2 y agua, lo que posibilita la fabricación de combustibles. Pero el coste de la electricidad consumida es alto.

Mientras la síntesis de combustible no se vuelva asequible, la humanidad deberá hacerse cargo de todas las emisiones que genere. Para almacenar el CO_2 producido en las plantas de energía se están desarrollando técnicas como el secuestro geológico y el secuestro mineral. Esas opciones son válidas para la captura de aire, pudiendo instalarse las máquinas de captación en los mismos lugares de almacenamiento.

Enfriamiento global

Hasta que no existan técnicas de transporte limpias más eficaces, la extracción del carbono atmosférico permitiría mantener el uso de combustibles líquidos en coches, aviones y barcos. Sus emisiones de CO_2 se recogerían en colectores lejanos. Y ahí radica la peculiaridad del problema. A diferencia del ozono o del dióxido de azufre, el CO_2 permanece decenios e incluso siglos en la atmósfera, con lo que se favorece su difusión. Se mezcla en la atmósfera por completo, de modo que es legítimo extraer CO_2 del aire en Australia y canjearlo por derechos (bonos) de emisión en Norteamérica. Incluso sería posible extraer una cantidad equivalente del gas antes de liberar las emisiones cubiertas por tales derechos; podría fabricarse un coche "neutralizado" respecto al carbono si se recogiera el total de emisiones estimadas en su vida útil (100 toneladas, por ejemplo) antes de que el vehículo saliera de la cadena de montaje.

La captura de aire representaría también un modo más económico de secuestrar las emisiones de plantas de energía, sobre todo las más antiguas, difíciles de equipar con purificadores de chimeneas, o las más distantes de los lugares de almacenamiento. En un mundo futuro, en el que las concentraciones de CO_2 en la atmósfera se hayan estabilizado, la captura de aire podría rebajar aún más los niveles del gas. De hecho, la estrategia también permitiría contrarrestar las emisiones anteriores.

Amén del coste, los críticos aducen que la proliferación de las unidades de captura consumiría gran cantidad de energía, y que en los filtros de la máquina se utilizan plásticos derivados del petróleo. En mi opinión, un obstáculo más importante estriba en la evaporación a la atmósfera de varias toneladas de agua por cada tonelada de CO_2 absorbido, a medida que los filtros húmedos se secan. Pero si la captura de aire se implantara a gran escala, tal vez empezaría a corregirse el cambio climático. Cada unidad transportable recogería alrededor de una tonelada de CO_2 al día. Diez millones de esas unidades atraparían 3,6 gigatoneladas anuales. Se conseguiría reducir así los niveles del gas en la atmósfera en cerca de 0,5 ppm al año. Y si, al cabo del tiempo, las unidades pudieran extraer 10 toneladas diarias (lo que exigiría mejoras en los sorbentes), la reducción anual llegaría a 5 ppm, un ritmo más rápido que la acumulación actual del gas en la atmósfera. Adviértase que aunque 10 millones de unidades de captura parezca una cifra enorme, el mundo produce cerca de 71 millones de coches y camiones ligeros *cada año*.

Inicialmente, el coste de capturar el CO_2 sería elevado, unos 160 euros por tonelada. No obstante, si la técnica siguiera las curvas normales de aprendizaje y producción, se llegaría a unos costes determinados sobre todo por los materiales y la energía, y la captura se situaría alrededor de 24 euros por tonelada. El coste que se añadiría a la gasolina por la captura del CO_2 generado por los vehículos equivaldría entonces a unos 5 céntimos de euro por litro, precio que bien vale la pena pagar.

PROCESOS QUE COMPITEN

Diversas organizaciones investigan sorbentes secos y húmedos que pudieran dar lugar a máquinas comerciales de captura de aire. Como ejemplo:

SORBENTES SECOS

Universidad de Columbia y Global Research Technologies:
polímero de carbonato

Instituto de Tecnología de Georgia y Global Thermostat:
polímero de carbonato

SORBENTES HUMEDOS

Laboratorio Nacional de Brookhaven:
solución de hidróxido

Universidad de Calgary y Carbon Engineering:
solución de hidróxido

Xerox PARC:
solución de hidróxido

Instituto Federal Suizo de Tecnología, Zúrich:
solución de hidróxido, cal

Instituto Paul Scherrer:
solución de hidróxido, cal

Bibliografía complementaria

CLIMATE STRATEGY WITH CO_2 CAPTURE FROM THE AIR. David W. Keith et al. en *Climate Change*, vol. 74, págs. 17-45; enero de 2006.

FIXING CLIMATE: WHAT PAST CLIMATE CHANGES REVEAL ABOUT THE CURRENT THREAT —AND HOW TO COUNTER IT. Wallace S. Broecker y Robert Kunzig. Hill and Wang, 2008.

CAPTURE OF CARBON DIOXIDE FROM AMBIENT AIR. Klaus S. Lackner en *European Physical Journal: Special Topics*, vol. 176, n.º 1; págs. 93-106; septiembre de 2009.

BLOOMBERG/GETTY IMAGES (*pozo de petróleo*); CORTESIA DE JIM DEMATTIA (*granja de algas*); WAVE/CORBIS (*cemento*)

¿Pensaban los neandertales como nosotros?

João Zilhão defiende su polémica hipótesis de que estos menospreciados parientes compartían nuestras capacidades cognitivas • **Kate Wong**

CONCEPTOS BASICOS

- Tradicionalmente, se ha considerado que *Homo sapiens* era la única especie con la capacidad de generar y utilizar símbolos.
- Pero en los últimos decenios se han descubierto ciertos objetos enigmáticos que indican que los neandertales, durante mucho tiempo considerados una especie intelectualmente inferior, también habrían exhibido un comportamiento simbólico. Sin embargo, los expertos descartaron esos hallazgos y los atribuyeron a *Homo sapiens*.
- El reciente descubrimiento de adornos neandertales y los indicios del uso de pintura corporal en dos yacimientos de España proporcionan pruebas contundentes de simbolismo en los neandertales y dan a entender que el comportamiento de los humanos actuales presenta un origen remoto.

Durante los dos últimos decenios, el arqueólogo João Zilhão, de la Universidad de Bristol, ha venido estudiando a nuestros parientes fósiles más próximos. Los neandertales habitaron en Europa durante 200.000 años hasta que hace 28.000 años desaparecieron misteriosamente. Los especialistas en este campo han debatido durante largo tiempo sobre las similitudes entre las capacidades cognitivas de los neandertales y las nuestras. Uno de los puntos centrales de la discusión lo ocupan una serie de yacimientos de neandertales que contienen indicios del uso de símbolos, como los adornos, un elemento que define el comportamiento humano moderno. Zilhão y otros científicos han defendido que los neandertales desarrollaron ese tipo de comportamiento por sí mismos antes de que los humanos anatómicamente modernos llegasen a Europa hace 40.000 años. En cambio, otros opinan que ese rasgo apareció con los *Homo sapiens*.

Pero el pasado enero, en un artículo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA,* el equipo de Zilhão presentó un hallazgo que podría zanjar la polémica: unas conchas con restos de pigmentos procedentes de dos yacimientos españoles de 50.000 años de antigüedad, unos 10.000 años antes de la llegada de los humanos anatómicamente modernos a Europa. Zilhão ha comentado con la redactora Kate Wong las implicaciones del descubrimiento.

Los paleoantropólogos han discutido sobre el comportamiento de los neandertales durante décadas. ¿A qué se debe tanta atención?

El debate de los últimos 25 años surge de una teoría que explica que los humanos anatómicamente modernos son originarios de Africa y que, a partir de ese continente, la especie se extendió por el resto del mundo reemplazando a otras especies humanas arcaicas, como los neandertales. A esta idea se añade el principio de que una especie se define por su anatomía y también por su comportamiento. Luego los neandertales, al ser anatómicamente distintos a los humanos actuales, no podrían mostrar un comportamiento de tipo moderno.

Pero hay varios inconvenientes en este modelo. En 1979, los arqueólogos que trabajaban en el yacimiento de Saint Césaire, en Francia, descubrieron un esqueleto de neandertal en un nivel que contenía restos de un tipo de tradición cultural denominado Chatelperroniense. En aquel tiempo, los científicos pensaron que los artefactos chatelperronienses (entre otros elementos, adornos corporales y utensilios de hueso muy elaborados) fueron creados por los humanos modernos. Sin embargo, los hallazgos de Saint Césaire estaban asociados a los neandertales. En 1995, otros científicos determinaron que los restos humanos hallados en unos niveles chatelperronienses de otro yacimiento francés, la Cueva del Reno de Arcy-sur-Cure, también pertenecían a neandertales.



VIKTOR DEAK

1. LOS ADORNOS CORPORALES DE LOS NEANDERTALES consistían en pintura facial y colgantes, según los descubrimientos recientes en dos yacimientos de Cartagena. Estos objetos indican que los neandertales presentaban pensamiento simbólico, un elemento crucial en el comportamiento de los humanos modernos.

Para hacer compatible esos descubrimientos con la idea de que los humanos actuales eran la única especie con destrezas tan complejas, algunos investigadores propusieron que los objetos simbólicos procedían de niveles superiores correspondientes a humanos modernos que se habían mezclado con los niveles de los neandertales. Otros pensaban que los neandertales simplemente habían copiado a los humanos modernos contemporáneos, o habían obtenido los objetos hurgando en yacimientos de humanos modernos o comerciando con éstos; y que en realidad no comprendían su significado y nunca los integraron en su cultura de la forma en que lo hacían los humanos actuales. Este debate nunca ha llegado a cerrarse de forma consensuada y es en este contexto donde debemos enmarcar nuestros descubrimientos en España.

¿Cuáles fueron y cómo se realizaron los descubrimientos?

Los restos proceden de dos yacimientos. El primero, de la Cueva de los Aviones (Cartagena), fue excavado en 1985 por Ricardo Montes Bernárdez, de la Fundación de Estudios Murcianos Marqués de Corvera. En sus publicaciones, Montes mencionaba que había recuperado tres conchas de berberecho perforadas, pero en ese momento se le prestó poca atención. Hace algunos años, después de leer sus artículos acerca de esas conchas, me desplacé al museo donde se custodiaban los materiales que él había encontrado y solici-

té permiso para estudiarlos. Inmediatamente me di cuenta de la importancia del hallazgo, porque cuando ese tipo de conchas aparece en yacimientos arqueológicos se interpretan como colgantes. Pero desconocíamos la edad exacta del material. Así que, en primer lugar, tomamos muestras para efectuar dataciones radiocarbónicas. El análisis reveló una antigüedad de entre 48.000 y 50.000 años.

Como la mayoría de las conchas de la colección nunca se había limpiado, las inspeccioné para ver si había algún otro ejemplar destacable. Una de las conchas correspondía a una ostra mediterránea; tras la limpieza, observamos una mancha que podía corresponder al residuo de un pigmento. Los análisis demostraron que la sustancia era una mezcla de lepidocrocita (pigmento de color rojo), de hematites finamente molido de color negro y rojo oscuro, y de pirita, que le daría mayor brillo. Descubrimos también un hueso de caballo de morfología apuntada que presentaba restos de pigmento en el extremo. Además, observamos acumulaciones de pigmento, entre ellas, un gran depósito del mineral natrojarosita. La cantidad y la pureza del mismo indicaban que se había almacenado dentro de algún tipo de bolso que habría desaparecido, preservándose tan sólo el mineral.



2. COLGANTE DE CONCHA DE VIEIRA pintado con pigmento naranja. La coloración pretendía quizá remedar en la parte externa de la concha (*mitad derecha*) el color natural de la cara interna (*mitad izquierda*). El pigmento que se identificó en el extremo de un metápodo de caballo, de morfología apuntada (*encima de la concha*), indica que los neandertales utilizaron este hueso para mezclar o aplicar el pigmento.

CORTESIA DE FRANCESCO D'ERRICO *Universidad de Bordeaux (hueso)*; CORTESIA DE JOÃO ZILHÃO *Universidad de Bristol (concha)*

¿Qué descubrieron en el segundo de los yacimientos?

En la misma época en que estudiaba la colección de la Cueva de los Aviones, también estaba trabajando con los restos de la campaña de excavación de 2008 de la Cueva Antón, otro abrigo situado a 60 kilómetros, hacia el interior, de la Cueva de los Aviones. Allí he estado excavando yacimientos de neandertales desde el año 2006. Uno de los restos consistía en una concha de peregrino perforada que uno de mis estudiantes había encontrado el segundo día de excavación. Al principio pensé que se trataba del fósil de una concha sin relación alguna con las actividades humanas. Pero cuando empecé a limpiarlo observé que era más reciente y que estaba coloreado. En un estudio más detallado, parecía que la cara externa de la concha, más blanquecina, se había pintado con un pigmento anaranjado que resultó ser una mezcla de hematites y goetita, otro mineral.

¿Qué utilidad daban los neandertales a esos objetos?

El aspecto interesante de la natrojarosita es que se conoce sólo su uso cosmético. Pensamos que en la Cueva de los Aviones se había utilizado para ese fin. El hueso de caballo con la punta enrojecida pudo haber servido para mezclar o aplicar el pigmento, o bien para perforar una piel teñida. La concha de ostra mediterránea con restos del pigmento rojo brillante tal vez se empleara como paleta de pintura. Por el contexto del descubrimiento, la explicación más sencilla sobre la natrojarosita y el pigmento rojo brillante es su utilización como pintura corporal y, más concretamente, como pintura facial. Pero desconocemos si los neandertales se lo aplicaban después de levantarse o si lo hacían por razones rituales o en ocasiones especiales como fiestas o para guardar luto.

Además, una de las conchas de berberecho perforadas de la Cueva de los Aviones exhibía restos de ocre rojo adheridos en la cara interna, cerca de la perforación. En ese caso, la explicación más probable es que la concha se había pintado, ya que no se puede utilizar una concha agujereada para guardar pigmento. Así, además de pintarse el cuerpo, los neandertales de ambos yacimientos poseían conchas perforadas coloreadas que tal vez usaban a modo de colgantes.

Los análisis no han podido demostrar que las perforaciones de los berberechos y las vieiras hubieran sido realizadas por los humanos. Tampoco se han hallado huellas de uso en los bordes de los agujeros. Entonces, ¿cómo pueden saber que se utilizaron como abalorios?
Esas especies de moluscos se encuentran sólo en aguas profundas, así que cuando fueron llevadas por las corrientes hasta las orillas ya no estaban vivas y no contenían carne; por tanto, no se recogieron para consumirlas. Además, están pintadas. ¿Existe otra explicación posible? Si se abre cualquier libro de etnografía sobre adornos de pueblos de Africa y Oceanía, se observan numerosos ejemplos del uso ornamental de estas conchas o de especies parecidas con perforaciones naturales.

¿Qué implicaciones tienen esos descubrimientos para entender el origen del comportamiento moderno en los humanos?
Lo único que demuestran los hallazgos es que los neandertales presentaban un comportamiento de tipo moderno. Los neandertales no eran como los humanos anatómicamente modernos pero eran cognitivamente tan avanzados como ellos. De ahí se extraen varias conclusiones posibles. Quizá las capacidades cognitivas y el comportamiento humano moderno emergieron por separado en dos líneas evolutivas, o bien ambos rasgos ya existían en el antepasado común de los neandertales y los humanos anatómicamente modernos. Yo prefiero la explicación de que los grupos bautizados por nosotros como neandertales y humanos modernos no representaban en realidad especies distintas y que, a pesar de sus diferencias anatómicas, no mostraban diferencias cognitivas.

En mi opinión, la emergencia del comportamiento humano moderno se produjo por una lenta y quizás intermitente acumulación de conocimientos que, paralelamente al incremento en la densidad de población, dio lugar a la aparición de sistemas de identificación social. En el registro arqueológico podemos documentar esos sistemas gracias a la presencia de adornos corporales, pintura corporal, etcétera. Pero cabe esperar que los primeros ejemplos de modernidad conductual serán escasos, ya que ésta es la forma en que se documenta el inicio de un proceso exponencial.

Así, el comportamiento moderno, representado por los adornos corporales, el arte y demás, ¿surgió como una necesidad de comunicarse o de identificar a los miembros de una población cada vez más numerosa?
Sí, en un mundo donde los encuentros con otros individuos eran cada vez más frecuentes, convenía saber si esa persona era un amigo o un enemigo, alguien a quien tu grupo debía un favor o si él te debía un favor.

¿Cree que antes de la aparición del comportamiento humano moderno se produjo algún cambio en el cerebro?
Sí, yo creo que sucedió hace entre 2 y 1,5 millones de años, o quizás hace entre 1 millón y 500.000 años, cuando el cerebro alcanzó el tamaño propio de los humanos actuales. Si pudiésemos clonar un humano de hace 500.000 años, mediante una madre de alquiler, y después de su nacimiento lo educásemos como un humano actual, ¿podría aprender a pilotar un avión? Quizás algunos investigadores opinarían que no, pero mi respuesta es afirmativa.

Si los neandertales hallados en España usaban adornos 10.000 años antes de que los humanos modernos llegasen a Europa, ¿piensa que en vez de que los neandertales copiaran a los humanos modernos sucedió lo contrario?
Antes de su llegada a Europa, los humanos modernos no perforaban dientes, como los hallados en el Chatelperroniense, ni tampoco perforaban las conchas de moluscos bivalvos, como los descubiertos en España. Pero una vez entraron en Europa, empezaron a hacerlo. ¿Dónde adquirieron ese comportamiento? Si estuviésemos hablando de una época más reciente, como la Edad del Cobre, sin duda concluiríamos que los recién llegados lo aprendieron de la población local. ¿Por qué razonar de otro modo cuando nos referimos a los neandertales?



3. JOÃO ZILHÃO ha defendido desde hace mucho tiempo que los neandertales desarrollaron comportamientos simbólicos de forma independiente a los humanos anatómicamente modernos.

CORTESIA DE JOSEFINA ZAPATA

Bibliografía complementaria

EXCAVACIONES EN EL YACIMIENTO MUSTERIENSE DE LA CUEVA DE LOS AVIONES (CARTAGENA, ESPAÑA). Ricardo Montes en *Murcia Arqueológica*, n.º 2, págs. 35-38; 1991.

LA APARICION DE LA MENTE MODERNA. Kate Wong en *Investigación y Ciencia*, págs. 76-85; agosto de 2005.

LA EXTINCION DE LOS NEANDERTALES. Kate Wong en *Investigación y Ciencia*, págs. 16-21; octubre de 2009.

SYMBOLIC USE OF MARINE SHELLS AND MINERAL PIGMENTS BY IBERIAN NEANDERTALS. João Zilhão et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 107, n.º 3, págs. 1023-1028; 19 de enero de 2010.

Fuego y evolución en el Mediterráneo

El fuego y los incendios forestales han existido siempre en la historia de la vida terrestre. Un gran número de especies vegetales han adquirido características que les confieren resistencia a los incendios recurrentes

Juli G. Pausas

CONCEPTOS BASICOS

- En los matorrales mediterráneos se han seleccionado, a lo largo de la evolución, dos características básicas que favorecen la persistencia en regímenes de incendios recurrentes: la capacidad de rebrotar y la capacidad de reclutar nuevos individuos tras el fuego.
- Las especies no están adaptadas al fuego, sino a un régimen de incendios determinado.
- Los incendios han moldeado numerosas especies de plantas y también a los humanos. Estos, a su vez, han moldeado los regímenes de incendios.

Las plantas y el fuego guardan una estrecha relación desde sus orígenes, ya que las primeras proporcionan oxígeno y combustible, dos elementos básicos para la existencia del segundo. El tercer elemento indispensable para el fuego es una fuente de ignición: rayos, volcanes, meteoritos y otros fenómenos que probablemente han existido siempre en la historia de la Tierra. Tras su aparición en el Silúrico (hace 450 millones de años), las plantas terrestres colonizaron todos los rincones del planeta; con ello incrementaron el oxígeno atmosférico y la biomasa inflamable. Según las huellas de incendios (carbones fósiles), éstos vienen produciéndose desde el inicio de la vida terrestre. Sin embargo, se observa una acumulación de carbones fósiles, indicativa de incendios masivos, en el Carbonífero (hace 359 millones de años). Durante esta época se alcanzó un máximo en la concentración de oxígeno (31 por ciento), que permitía a la vegetación arder incluso en condiciones de humedad elevada. A partir de entonces, los niveles de oxígeno se estabilizaron de forma progresiva; a mediados del Terciario, alcanzaron valores similares a los actuales (21 por ciento).

Además de los cambios en la concentración de oxígeno atmosférico, que tuvieron una incidencia notable en el régimen de incendios durante el Paleozoico, la vida en la Tierra ha sufrido otros grandes cambios que han ido modificando la frecuencia, estacionalidad, intensidad y tipo de incendios, es decir, el régimen de incendios.

En primer lugar, las variaciones de isótopos de oxígeno en los hielos antárticos o en sedimentos oceánicos demuestran que el clima ha ido cambiando durante la historia de la vida en la Tierra. Ello sugiere cambios en el régimen de incendios, puesto que éste depende en gran medida del régimen de precipitación y temperatura.

Otro de los factores que alteran el régimen de incendios corresponde a los cambios en la abundancia de herbívoros, ya que fuegos y herbívoros comparten los mismos recursos (las plantas). La abundancia de grandes herbívoros mantiene unos niveles bajos de biomasa vegetal, lo que limita el tamaño y la intensidad de los incendios. Las extinciones masivas del Cretáceo-Terciario (dinosaurios) y del Holoceno (mamuts) generaron importantes acumulaciones de combustible y modificaron



1. TIPICO INCENDIO del matorral mediterráneo, donde las plantas se ven completamente afectadas por el fuego (incendio de copa).

J. G. PAUSAS

los regímenes de incendios (pensemos que un elefante actual, más pequeño que muchos herbívoros primitivos, consume unos 200 kilogramos de vegetación al día).

El tercer factor determinante para el régimen de incendios también guarda relación con la fauna: en concreto, con la especie *Homo sapiens*. Por un lado, el dominio del fuego favoreció la evolución de los homínidos. Por otro, durante los últimos milenios, los humanos hemos alterado la estructura de la vegetación (combustible) y el número de igniciones en la mayor parte del planeta.

Todos esos cambios en el régimen de incendios pueden identificarse a partir de los micro y macrocarbones acumulados en turberas y en los fondos oceánicos. Desgraciadamente, existen muy pocos datos de carbones que se remonten al Terciario, pues la mayoría incluyen sólo el Cuaternario y, en especial, el Holoceno (los últimos 12.000 años). Debido a esta falta de datos, conocemos escasos detalles de la variabilidad temporal de los incendios a lo largo de la historia de la vida.

Las variaciones en el régimen de incendios no son sólo de tipo temporal. Para cada momento de la historia —incluido el actual— existen distintos regímenes en diferentes ecosistemas debido a la variación espacial de los factores que determinan los incendios (estructura de la vegetación, clima, igniciones, herbívoros, etcétera). Las zonas de clima mediterráneo son propensas a los incendios estivales porque en verano el clima es seco y cálido. Por tanto, puede decirse que los incendios en el Mediterráneo son al menos tan antiguos como el clima mediterráneo (Cuaternario) o incluso anteriores, ya que previamente ya se habían dado condiciones climáticas estacionales propicias para incendios. El clima precuaternario probablemente produjo regímenes de incendios similares a





2. EL BREZO RUBIO (*Erica australis*) rebrota tras un incendio a partir de las yemas que tiene en el lignotubérculo (*a*). El oxicedro o enebro de miera (*Juniperus oxycedrus*) rebrota poco después de un incendio (*b*); en la imagen aparece rodeado de plántulas de jaras (*Cistus*). El alcornoque (*c*) posee una gruesa corteza (corcho) que protege sus tejidos de crecimiento frente a los incendios. La aliaga morisca (*Ulex parviflorus*) es una especie muy inflamable, ya que acumula gran cantidad de biomasa seca y fina que arde con gran facilidad (*d*). Además, esta especie forma en el suelo un banco de semillas cuya germinación es estimulada por el calor del fuego. El fuego aumenta, pues, la eficacia biológica de esta especie típicamente reclutadora.

P. MAIA (*brezo*), J. G. PAUSAS (*enebro, alcornoque y aliaga morisca*)

los que se dan actualmente en algunas zonas tropicales.

Por qué el mundo es verde

La información disponible en la actualidad nos obliga a abandonar el paradigma tradicional que suponía que los incendios eran un factor reciente en la historia y especialmente ligado a la población humana. Ahora podemos afirmar que el fuego ha estado siempre presente en la historia de la vida, que las especies han ido evolucionando junto con la presencia de incendios recurrentes y que, por tanto, los incendios han contribuido a moldear las especies que pueblan la Tierra.

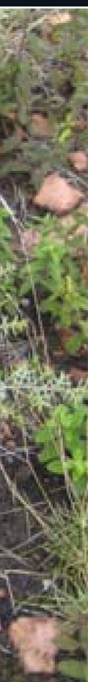
De la misma manera, el conocimiento actual de la larga historia de incendios en nuestro planeta obliga a modificar las teorías sobre los factores que determinan la vegetación. Se pensaba que la vegetación dependía, sobre todo, de la disponibilidad de recursos, que, a su vez, venía determinada por factores climáticos y por los nutrientes del suelo. Numerosos libros de ecología y vegetación se basan todavía en esta hipótesis.

Ya en los años sesenta se propuso una nueva visión, según la cual la vegetación estaría controlada por depredadores y parásitos; sin la existencia de estos organismos, los herbívoros consumirían toda la vegetación y el mundo dejaría de ser verde. A la luz de la larga historia de fuegos en los ecosistemas terrestres, es de esperar que los incendios hayan tenido un papel clave en los patrones actuales de vegetación. De hecho, los fuegos son grandes consumidores de vegetación; compiten con los herbívoros por el mismo recurso. Los modelos de simulación de la vegetación a escala global (similares a los que se usan para predecir los cambios climáticos) no reproducen los biomas terrestres a menos que se considere que en muchos ecosistemas se producen incendios de manera recurrente. Por tanto, para entender la vegetación actual debemos tener en cuenta el fuego.

Plantas y fuego en el Mediterráneo

El fuego ejerce un gran impacto en las plantas: destruye la mayoría de sus tejidos aéreos. Es la perturbación natural de mayor impacto en la vegetación (comparado con tormentas, huracanes, herbívoros y sequías, entre otras). Las plantas que medran en ambientes con incendios frecuentes han adquirido, en el transcurso de la evolución, una serie de características funcionales que les confieren resistencia a los incendios reiterados; tales características tienen, por tanto, un valor adaptativo.

En los ecosistemas mediterráneos, sean bosques o matorrales, la mayoría de los incendios son de copa: afectan a toda la parte aérea de las plantas (*véase el recuadro* “El régimen de incendios”). En estos ambientes, los principales rasgos seleccionados son los que guardan







relación con la capacidad de rebrotar y la capacidad de reclutar nuevos individuos tras el incendio.

En ecosistemas con incendios de superficie, las características que confieren persistencia son el grueso de la corteza de los árboles y la capacidad de rebrotar del sotobosque. En la actualidad, los incendios de superficie son raros en la cuenca mediterránea (se dan en algunos bosques de coníferas de montaña), debido en parte a la política de prevención y extinción de incendios, que ha resultado en importantes acumulaciones de biomasa. Estas acumulaciones facilitan el paso del fuego de la superficie a las copas, lo que genera incendios de mayor intensidad.

Para una planta, la capacidad de rebrotar después de haber quedado completamente afectada por el fuego constituye una característica fundamental para la persistencia en ambientes con incendios frecuentes. Este rasgo confiere resistencia no sólo a las poblaciones, sino también a los individuos, ya que la parte subterránea de la planta no muere. Ello no es exclusivo de los ecosistemas mediterráneos ni de los ecosistemas con incendios recurrentes. Se observa también en numerosas especies de comunidades que raramente arden (selvas tropicales lluviosas, ecosistemas templados fríos y zonas desérticas, entre otras).

La creencia de que los incendios constituyen un fenómeno reciente junto con la ubicuidad de la capacidad de rebrote han contribuido a considerar el rebrote no como una adaptación al fuego, sino como una adaptación a otras y diversas perturbaciones frecuentes (ventadas, herbivoría, sequías). Sin embargo, el conocimiento actual de la larga historia de incendios en la Tierra sugiere que el fuego también ha contribuido a moldear el rebrote, al menos en algunos linajes. De hecho, la capacidad de rebrotar es un rasgo complejo: existen varios mecanismos, cada uno de ellos relacionado con diferentes presiones de selección natural.

Algunas especies rebrotan a partir de yemas hundidas y fuertemente protegidas por la corteza; la selección de este rasgo parece guardar relación con la protección ante las elevadas temperaturas producidas por los incendios. Otras especies rebrotan a partir de lignotubérculos, estructuras exclusivas de especies de ambientes sometidos a incendios recurrentes. Además, muchas plantas rebrotadoras almacenan en las raíces grandes cantidades de sustancias de reserva para poder regenerar rápidamente la biomasa aérea; esta adaptación supone un gran coste, difícilmente explicable como respuesta a la herbivoría, al menos en plantas leñosas.

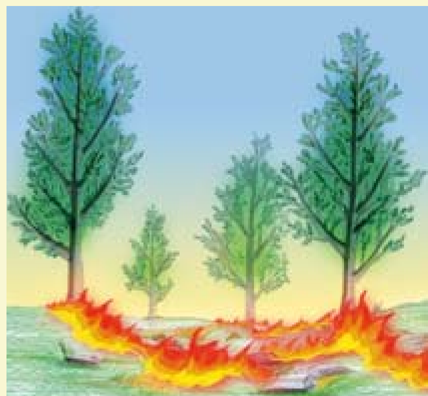
La capacidad de rebrotar es un rasgo muy ancestral. Se observa en un gran número de especies antiguas (helechos y coníferas primitivas, entre otras), si bien algunas la han adquirido de forma secundaria (ciertos pinos);

EL REGIMEN DE INCENDIOS

En una determinada área o ecosistema, los incendios se caracterizan por la frecuencia, intensidad, estacionalidad y tipo. Estos parámetros definen el régimen de incendios. Las especies no están adaptadas al fuego en sí, sino a un régimen de incendios particular. Existen tres tipos básicos de incendios: de copa, de superficie y de subsuelo.



INCENDIOS DE COPA (o de reemplazamiento)
El fuego afecta a la mayor parte aérea de las plantas; la regeneración reemplaza la vegetación. Es el régimen típico de los matorrales mediterráneos y de los bosques densos (encinares, pinares de pino carrasco, etcétera). En los bosques boreales, los incendios también son de copa, pero presentan frecuencias más bajas e intensidades mayores que en los bosques mediterráneos. En los ecosistemas con incendios de copa y frecuencia elevada (matorrales mediterráneos), dominan las especies rebrotadoras y especies con gran capacidad de reclutar después del fuego.



INCENDIOS DE SUPERFICIE
El fuego afecta prácticamente sólo al sotobosque. Suelen ser incendios de poca intensidad pero frecuencia elevada. Se dan en bosques relativamente abiertos, como en las sabanas y en algunos bosques de coníferas de la montaña mediterránea. En estos sistemas dominan los árboles con corteza gruesa y el sotobosque de herbáceas rebrotadoras.



INCENDIOS DE SUBSUELO
No generan llamas en la superficie, sino que arde el subsuelo; se dan típicamente en turberas. Se observan sobre todo en zonas boreales. Actualmente son raros en zonas mediterráneas por la escasez de turberas y su elevada antropización.

estos casos corresponden a especies que viven en ambientes con incendios recurrentes. En la actualidad se están realizando estudios sobre la función del fuego en la evolución de la capacidad de rebrote, pero no hay duda de que ciertos tipos de rebrote de algunos linajes son producto de la historia de fuegos.

La capacidad de reclutar nuevos individuos tras un fuego constituye otra característica común en ambientes mediterráneos; confiere persistencia a las poblaciones en entornos con incendios recurrentes. Esta capacidad se da en plantas que acumulan un banco de semillas (en el suelo o en la copa) resistentes al calor del fuego.

El fuego estimula el reclutamiento mediante varios procesos, según la especie: el calor rompe la dormición de las semillas (en especies con semillas duras e impermeables); el humo estimula la germinación, el crecimiento de las plántulas o ambos (en especies con semillas permeables); y el calor estimula la dispersión de las semillas (en especies serótinas, es decir, con banco de semillas aéreo). Mediante estos procesos, las poblaciones se restablecen rápidamente en los espacios abiertos que los incendios generan; a menudo aumenta el tamaño poblacional respecto a las condiciones previas al incendio.

Dado que las poblaciones que se queman se ven favorecidas (dejan una mayor descendencia), numerosas especies han adquirido rasgos que les confieren una elevada inflamabilidad. De hecho, existe una correlación evolutiva entre la inflamabilidad y la capacidad de reclutar de forma rápida y prolífica nuevos individuos tras un incendio. Esta capacidad es prácticamente exclusiva de los ecosistemas mediterráneos. Su desarrollo responde, sin duda, a la presión de selección que generan los fuegos recurrentes.

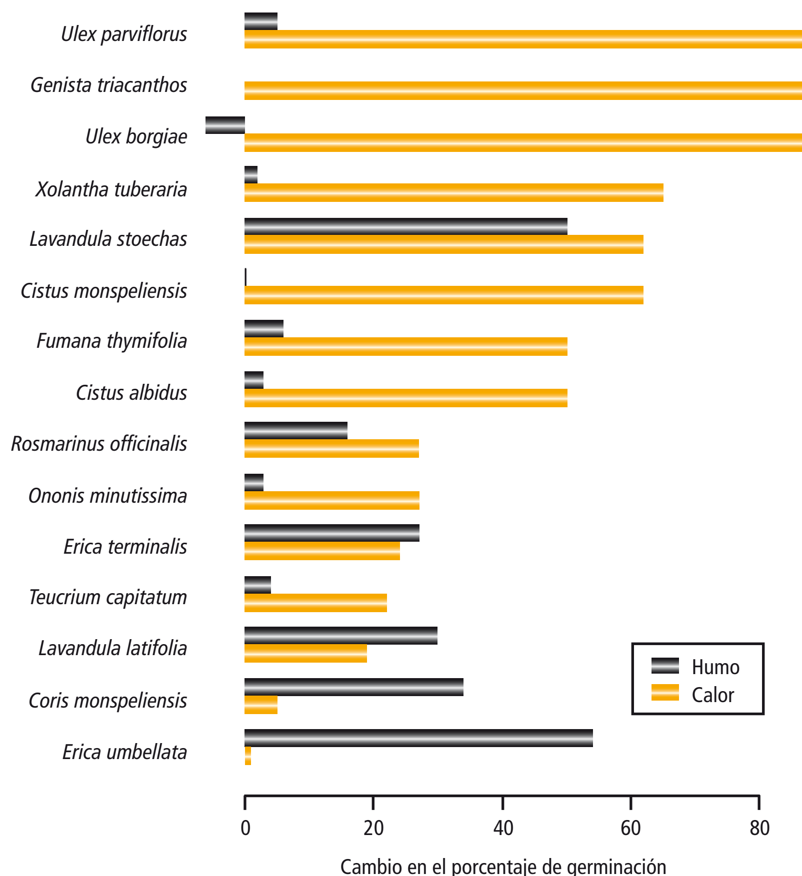
Asimismo, la capacidad de producir descendencia rápidamente tras el incendio facilita a los individuos la adquisición de nuevos rasgos (especiación). Ello explica que muchos de los puntos calientes de biodiversidad del planeta correspondan a zonas con incendios frecuentes. En la cuenca mediterránea, la diversificación de numerosos linajes (Cistáceas y algunos linajes de Leguminosas y Labiadas, entre otros) puede estar ligada a los fuegos recurrentes. Esta relación entre diversidad e incendios es aún más evidente en otras zonas de clima mediterráneo, como los matorrales de Sudáfrica o de Australia.

En los ecosistemas mediterráneos con incendios de copa, las plantas cuentan con varios mecanismos de regeneración: las hay que utilizan el rebrote (especies rebrotadoras); otras el reclutamiento (especies germinadoras o reclutadoras); y algunas ambos mecanismos a la vez (especies facultativas). Existen también

especies que carecen de estas estrategias; sus poblaciones desaparecen tras el fuego. Algunas de ellas recolonizan con prontitud (especies con elevada producción de semillas y mecanismos de dispersión eficientes); otras, lentamente.

En la cuenca mediterránea, las capacidades de rebrotar y de reclutar tras un incendio presentan una correlación evolutiva negativa: algunos linajes están dominados por especies rebrotadoras (Fagaceae y Rhamnaceae); otros por reclutadoras (Cistaceae); pero son raros los géneros que poseen ambos tipos de especies, rebrotadoras y germinadoras (algunas Ericaceae y Fabaceae). De hecho, la capacidad de reclutar se adquirió evolutivamente más tarde que la de rebrotar (rasgo muy ancestral), sobre todo en linajes sin capacidad de rebrotar.

En ecosistemas donde los incendios son de superficie, dominan especies de árboles con una corteza gruesa que protege los tejidos vitales del calor de los incendios. Pequeñas diferencias en el grosor de la corteza, especialmente en la parte basal del tronco, pueden condicionar la supervivencia del árbol frente a un incendio de superficie y, por tanto, favorecer la selección de individuos con corteza gruesa. Así, las especies de pinos que viven en zonas con incendios de superficie presentan cortezas más gruesas que las que viven en zonas de incendios de copa, donde la corteza gruesa no proporciona ninguna ventaja. Incluso dentro de la misma especie, poblaciones que medran



3. CAMBIO EN EL PORCENTAJE DE GERMINACION de semillas debido al tratamiento con calor o humo (valores positivos indican estimulación de la germinación) para quince especies de plantas mediterráneas.





4. BOSQUE DE PINO NEGRAL (*Pinus nigra*) afectado por un incendio de superficie (*izquierda*). La mayoría de los árboles sobrevivieron al incendio. En un incendio de copa, como el del matorral mediterráneo que aparece en la fotografía (*derecha*), las plantas se ven severamente afectadas.

JULI G. PAUSAS (*arriba y abajo izquierda*); B. MOREIRA (*abajo, derecha*)

El autor

Juli G. Pausas desarrolla su labor en el Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE) del CSIC. Especialista en ecología vegetal, se dedica sobre todo a la ecología del fuego y de la regeneración. Le interesa comprender la función del fuego en la evolución de las especies, las poblaciones, las comunidades y el paisaje.

en zonas con incendios de superficie tienden a desarrollar cortezas más gruesas.

Un caso especial de corteza gruesa y aislante corresponde al de los alcornoques. ¿Qué tipo de escenario favorecería la selección de un material tan aislante para la corteza de un árbol, sino uno con incendios recurrentes? Otras especies (pertenecientes a linajes muy distantes entre sí) presentan cortezas gruesas y fuertemente suberificadas, semejantes a la del alcornoque; todas ellas medran en ambientes con fuegos frecuentes en diversas partes del mundo. Un caso claro de convergencia evolutiva.

Fuego y evolución humana

El origen de los humanos está fuertemente ligado al fuego: *Homo erectus* fue la primera especie que controló el fuego, lo que favoreció la evolución hacia *Homo sapiens*. La ingestión de alimentos cocidos mejoró la dieta en cuando a valor nutricional (mayor cantidad de proteínas y carbohidratos) y variedad (el efecto detoxificante de la cocción permitió ampliar el abanico de alimentos comestibles). Ello confirió a *Homo erectus* ventaja respecto al resto de homínidos que no utilizaban el fuego.

Además, cocinar forzó el desarrollo de habilidades sociales típicas de los humanos. Se pasó de la recolección y consumo individual e inmediato a la recolección y posterior cocción y consumo colectivo. Esto llevó al reparto de tareas (recolectar y almacenar comida, vigilar —y robar— la comida almacenada, cocinar, etcétera), así como al acto social de comer y conversar alrededor del fuego. En conjunto, dichos cambios repercutieron en la evolución de características físicas (dientes y mandíbulas de menor tamaño) y sociales.

Cocinar alargó la esperanza de vida, no sólo por el mayor aporte de alimentos, sino también porque el acceso a comida blanda permitía alimentarse incluso cuando la dentadura había perdido dureza y resistencia. Además, al prolongar la esperanza de vida más allá de la edad reproductiva de las mujeres, permitió el cuidado y la reducción de la mortalidad de los nietos (el "efecto abuela"), lo que aumentó todavía más la eficacia biológica de los humanos gracias al uso del fuego.

El fuego también revistió suma importancia para defenderse de depredadores y enemigos. Permitió a los homínidos colonizar ambientes fríos cuando salieron de Africa. Los más primitivos no dominaban el fuego, por lo que se consideraba un tesoro muy preciado —llegaban a luchar por él—. Se discute todavía el momento en que los humanos domesticaron el fuego. Se han hallado registros de restos de hogueras en el este de Africa de hace 1,5 millones de años y otros más claros en Oriente Medio de 800.000 años de antigüedad.

Una vez adquirido el control del fuego, los humanos empezaron a utilizarlo para numerosas actividades domesticas (cocinar, producir luz, calentarse) y adquirir recursos del entorno. A menudo quemaban el monte para conseguir brotes tiernos, cazar, generar pastos y luchar entre poblados. También el desarrollo de la agricultura se vio favorecido por el uso del fuego; se cree que uno de los motivos por los que la agricultura surgió y se expandió rápidamente en el Mediterráneo fue la facilidad de quemar (desforestar) estos ambientes. Las quemas practicadas por los humanos y la fragmentación del paisaje (y del combustible) debido a la expansión de la agricultura y los poblados hicieron que el régimen de incendios fuera cambiando a lo largo de la historia. En algunos sitios, disminuyó la frecuencia; en otros, aumentó.

Dichos incrementos de población y roturación del suelo se dieron durante el Holoceno, en paralelo al aumento de la sequía característico de este período. No sabemos con certeza en qué medida las alteraciones del régimen de incendios se deben a la actividad humana o a los cambios climáticos; en ese período debieron intervenir ambos factores.

Con la industrialización y la modernización de la sociedad, se produjo en la cuenca mediterránea un cambio drástico en el paisaje y en

REBROTE Y RECLUTAMIENTO

Principales diferencias funcionales entre plantas que rebrotan y plantas que reclutan tras un incendio para especies de la cuenca mediterránea. Se indican tendencias generales; ciertas especies utilizan ambos mecanismos (rebrote y reclutamiento).

	ESTRATEGIA REBROTADORA	ESTRATEGIA RECLUTADORA
Longevidad	Larga	Corta
Edad de maduración	Tardía	Temprana
Velocidad de crecimiento	Lenta	Rápida
Relación biomasa radical/biomasa aérea	Elevada	Baja
Estructura radical	Raíces profundas	Raíces superficiales y más ramificadas
Tipo de fruto (diáspora)	Grande, a menudo carnoso	Pequeño, seco
Tipo de dispersión	Vertebrados	Viento, hormigas
Longevidad de la semilla (en el suelo; en la copa para las especies serotinas)	< 1 año	> 1 año
Tolerancia a la sombra	Alta	Baja
Respuesta a la sequía	Evasión	Tolerancia

LA SEROTINIA: DISPERSION POR FUEGO

Ciertas especies, aunque producen semillas cada año, no las liberan anualmente. En su lugar, las van acumulando en la copa (al menos una parte de la producción), encerradas en estructuras leñosas (conos serótinos), y las liberan cuando se produce un incendio. El calor del fuego abre los conos serótinos y permite la dispersión de las semillas en el ambiente postincendio, un entorno abierto y con elevada disponibilidad de recursos que facilita el reclutamiento de nuevos individuos.

Este fenómeno, la serotinia (o serotinismo), es común en Sudáfrica y Australia, y más raro en el hemisferio norte, donde es casi exclusivo de ciertas coníferas. En la cuenca mediterránea se da en determinados pinos (*Pinus halepensis*, *Pinus brutia*, *Pinus pinaster*) y en el ciprés (*Cupressus sempervirens*). Podría decirse que las especies con conos serótinos están adaptadas al fuego. Sin embargo, si los fuegos son muy frecuentes, de modo que entre un incendio y otro no hay tiempo para que se produzcan suficientes piñas, estos pinos no logran regenerarse. Ello demuestra que las especies no están adaptadas al fuego, sino a un régimen de fuegos determinado (por ejemplo, incendios de copa con intervalos entre incendios mayores a la edad de maduración).





El calor del próximo incendio abrirá estas piñas cerradas (serotinas) de pino carrasco (*Pinus halepensis*) (*a*) para liberar las semillas y favorecer la regeneración (*b*).

el régimen de incendios, sometido hasta entonces a una gran presión agrícola y ganadera, y a un uso intensivo de los montes. El abandono de la agricultura y la ganadería durante el final del siglo xx llevó a un incremento del combustible y de la continuidad espacial de éste. La proliferación de plantaciones de árboles, sobre todo coníferas, y las políticas de prevención y extinción de incendios contribuyeron a este aumento del combustible inflamable. Este cambio drástico, similar quizás a extinciones pasadas de grandes herbívoros, junto con el incremento de igniciones inherente al aumento de la población, y aderezado con una subida de la temperatura (debido al efecto invernadero) ha generado durante los últimos cuarenta años un aumento del tamaño y la frecuencia de los incendios en muchos de nuestros paisajes. Este incremento se ha producido a pesar de la intensificación paralela de los esfuerzos de control y extinción de fuegos.

Sin duda, existen determinados regímenes de incendios que son naturales y característicos de ciertos ecosistemas. Asimismo, parte de la diversidad de nuestros ecosistemas se explica por la existencia reiterada y predecible de incendios. Sin embargo, también es verdad que determinadas zonas están sufriendo regímenes de incendios que exceden los parámetros naturales y con graves consecuencias ecológicas.

La gestión forestal no debería dirigirse a la eliminación de los incendios, ya que es prácticamente imposible, además de poco natural. Por el contrario, deberían asumirse ciertos regímenes sostenibles de incendios y aprender a convivir con ellos. Estos regímenes varían con el tipo de ecosistema, ya que cada especie está adaptada a una historia de fuegos distinta. La eliminación temporal de incendios suele conllevar períodos de acumulación de biomasa, que en momentos de sequía pueden generar incendios de gran extensión e intensidad, con consecuencias negativas para la flora y la fauna. El reto de nuestra sociedad consiste en saber gestionar el paisaje y los ecosistemas para reducir los daños que producen los incendios en los humanos (muertes y destrucción de infraestructuras), al propio tiempo que se generan regímenes ecológicamente sostenibles.

JULI G. PAUSAS Y T. GIMENO

Bibliografía complementaria

PLANT PERSISTENCE TRAITS IN FIRE-PRONE ECOSYSTEMS OF THE MEDITERRANEAN BASIN: A PHYLOGENETIC APPROACH. J. G. Pausas y M. Verdú en *Oikos*, vol. 109, págs. 196-202; 2005.

FIRE AS GLOBAL 'HERBIVORE': THE ECOLOGY AND EVOLUTION OF FLAMMABLE ECOSYSTEMS. W. J. Bond, J. E. Keeley en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 20, págs. 387-394; 2005.

A BURNING STORY: THE ROLE OF FIRE IN THE HISTORY OF LIFE. J. G. Pausas y J. E. Keeley en *BioScience*, vol. 59, n.º 7, págs. 593-601; 2009.

El ingrediente secre de la Tierra

El descubrimiento de un nuevo mineral de alta densidad revela que el manto terrestre es más activo de lo que se sospechaba. Ello aporta nuevos indicios sobre la historia del planeta • Kei Hirose

La excavación más profunda realizada por el hombre (en la península de Kola, en Rusia) alcanza los 12 kilómetros de profundidad. A pesar de haber enviado una sonda espacial en dirección a Plutón, a unos seis mil millones de kilómetros del Sol, hoy en día sigue siendo imposible enviar una al centro de la Tierra. El centro del planeta, a 6380 kilómetros de profundidad, se halla a efectos prácticos más lejos que los límites del sistema solar. De hecho, Plutón fue descubierto en 1930. Sólo seis años después se obtuvieron los primeros indicios sismológicos sobre la existencia del núcleo interno de la Tierra.

A pesar de todo, contamos con una asombrosa cantidad de información sobre nuestro planeta. Sabemos que exhibe, a grandes rasgos, una estructura similar a la de una cebolla en la que el núcleo, el manto y la corteza forman capas concéntricas. El manto, cuya lenta convección genera los cataclismos geológicos de la corteza, constituye prácticamente el 85 por ciento del volumen del planeta. Esta capa intermedia se halla compuesta por una mezcla de silicio, hierro, oxígeno y magnesio a la que se añaden cantidades menores de otros elementos. A lo largo de toda la extensión del manto las concentraciones de estos elementos son casi constantes. Sin embargo, en función de su profundidad, los mismos se combinan de distinta manera para dar lugar a diferentes tipos de minerales. Ello da origen a las distintas capas concéntricas en las que se divide el manto, en cada una de las cuales predomina un mineral diferente.

Aunque hace decenios que se conocen la naturaleza y la composición de esas capas, la más profunda se seguía considerando, hasta hace poco, un tanto enigmática. En 2002, sin embargo, nuestro laboratorio logró reproducir las temperaturas y presiones existentes en los 300 kilómetros más profundos del manto. Al conseguir tales condiciones logramos sintetizar un nuevo mineral, muy denso, que explicaba varios de los misterios de esa capa de la tierra.

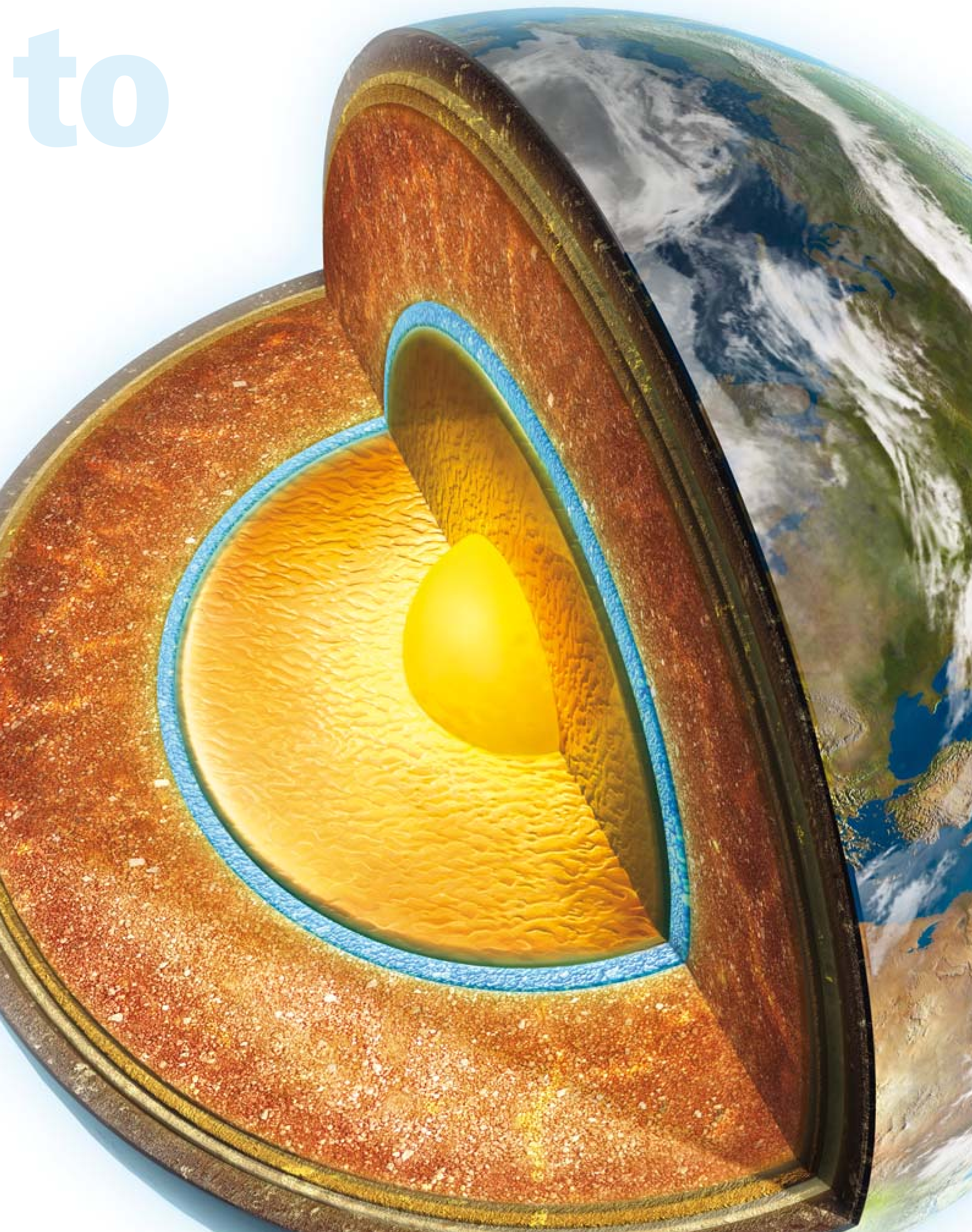
Investigaciones posteriores han revelado que dicho mineral, al que dimos el nombre de *postperovskita*, induce efectos drásticos en la dinámica del planeta. Su aparente presencia en el manto implica que las corrientes de convección que tienen lugar allí (la roca más fría desciende y la más caliente sube, transportando consigo parte del calor interno de la Tierra) son más dinámicas y transfieren calor de manera más eficiente de lo que se creía. En ausencia de postperovskita, los continentes habrían crecido más lentamente y la actividad volcánica habría sido menos intensa. Además, la formación de postperovskita pudo haber aumentado la intensidad del campo magnético terrestre, cuya protección de los rayos cósmicos y del viento solar permitió el salto de la vida a tierra firme. En

CONCEPTOS BASICOS

- A altas presiones, la perovskita, el mineral más abundante en el manto inferior terrestre, experimenta un cambio de estructura y aumenta su densidad.
- La presencia de esta fase densa implica que la dinámica y el flujo térmico en el manto son mayores de lo que se estimaba.
- Una transferencia de calor más rápida ayudaría a explicar por qué los continentes crecieron tan deprisa, así como la manera en que la evolución del campo magnético terrestre hizo posible el salto de la vida a tierra firme.

KEITH KASNOT

to



Un planeta más complejo

La estructura de la Tierra es como la de una cebolla en la que cada capa se compone de distintos materiales. El descubrimiento de un nuevo material de alta densidad, la postperovskita, implica la existencia de una capa adicional y explica el comportamiento de las ondas sísmicas al propagarse por el interior del planeta.

CORTEZA (6-35 km)
PROFUNDIDAD (km)
410
520
660
2600
2900
5100
6400
MANTO
MANTO SUPERIOR
MANTO INFERIOR
NUCLEO
Olivino
Espinela modificada
Espinela
Perovskita
Postperovskita
Núcleo externo
Núcleo interno

CORTEZA (HASTA LOS 35 KM DE PROFUNDIDAD)

Los continentes se hallan compuestos por diferentes tipos de roca, con edades de varios miles de millones de años y de baja densidad relativa, por lo que flotan sobre el manto subyacente, más denso. Las rocas basálticas pesadas del grueso de la corteza oceánica se forman a partir de magma de origen mantélico, el cual emerge por las dorsales oceánicas y desciende de nuevo hacia el manto en ciclos de unos 100 millones de años.

MANTO

Las rocas del manto se componen sobre todo de oxígeno, silicio y magnesio. A pesar de ser en su mayor parte sólido, en escalas de tiempo geológico el manto se deforma debido a las corrientes de convección. Este flujo disipa el calor interno de la Tierra y constituye el motor de la deriva continental.

MANTO SUPERIOR (35-660 KM)

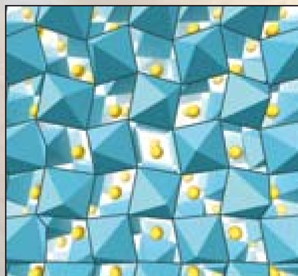
A medida que la presión y la temperatura aumentan con la profundidad, los componentes elementales del manto se ordenan en distintas estructuras cristalinas (minerales) y dan lugar a las diferentes capas. Las tres capas del manto superior reciben el nombre del mineral predominante: olivino, espinela modificada y espinela.

MANTO INFERIOR (660-2900 KM)

Durante décadas, se pensó que la estructura del manto inferior era uniforme. Sin embargo, los datos sísmicos indicaban que la región más profunda exhibía un comportamiento peculiar.

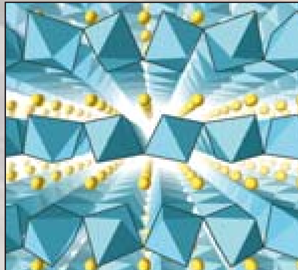
- **Capa de perovskita**

  El mineral predominante en esta capa (70 por ciento en peso) es un silicato de magnesio ($MgSiO_3$) perteneciente a la familia de estructuras cristalinas llamadas perovskitas. En esta estructura altamente compactada, los iones de magnesio (*amarillo*) se rodean de grupos octaédricos de silicio y oxígeno (*azul*). Hasta hace poco, se consideraba que estos elementos no podían organizarse en una estructura cristalina más densa.



- **Capa de postperovskita**

  A las presiones y temperaturas existentes en los 300 kilómetros de la parte inferior del manto, la perovskita experimenta una transición de fase: los iones de magnesio y los grupos de silicio y oxígeno se reorganizan en dos capas separadas. Esta transición libera calor y reduce el volumen en un 1,5 por ciento. Una pequeña diferencia, pero con efectos drásticos a escala planetaria.



NUCLEO (2900-6400 KM)

La capa más profunda de la Tierra se compone fundamentalmente de hierro líquido en el núcleo externo y sólido en el núcleo interno. El núcleo externo y el manto se mueven por convección, pero, debido a que el núcleo es mucho más denso, ambas capas casi no se mezclan. Se cree que la convección del núcleo genera el campo magnético del planeta.

KEITH KASNOT (*sección*); KEN EWARD (*minerales*)

definitiva, la postperovskita resulta clave para comprender la evolución de nuestro planeta.

Tocando fondo

La estructura interna de la Tierra se cartografía mediante el estudio de las ondas sísmicas. Debido a que las mismas se propagan a través de todo el planeta, tras un terremoto resulta posible detectarlas en el otro extremo del globo. Cuando alcanzan la superficie de separación entre dos materiales, esas ondas se reflejan y se refractan. El análisis de su comportamiento a escala planetaria ha demostrado que el manto se divide en cinco capas. En la frontera entre dos capas adyacentes tiene lugar un cambio brusco en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Los cambios estructurales en la roca que provocan esas discontinuidades en el comportamiento de las ondas se deben, a su vez, a las variaciones de presión y temperatura que se suceden a medida que nos adentramos en las profundidades de la Tierra.

Una roca está compuesta por diferentes minerales. Un mineral es un conjunto de átomos ordenados según cierta estructura cristalina; es decir, según un patrón geométrico determinado. Cada mineral presenta su propia composición y propiedades físicas, como un color característico (tómense como ejemplo los diferentes granos de una encimera de granito). En el manto, por debajo de determinados umbrales de profundidad, las enormes presiones y temperaturas hacen que los elementos se reordenen en nuevas estructuras cristalinas. El material experimenta una "transición de fase".

Debido a la imposibilidad de analizar de manera directa las capas profundas de la Tierra, antiguamente los geólogos habían de limitarse a estudiar las rocas que llegaban del manto a la superficie terrestre. Estas contienen con frecuencia diamante, mineral que se forma a las presiones y temperaturas que existen por debajo de los 150 kilómetros de profundidad. Así, se asume que las rocas que alojan diamantes se han formado a una profundidad similar y, por ello, proporcionan una valiosa información sobre la región superior del manto. Sin embargo, a la superficie no suelen aflorar rocas o minerales mantélicos originados en profundidades superiores a los 200 kilómetros.

Conforme se hizo posible generar altas presiones y temperaturas en el laboratorio, se sintetizaron los minerales que, supuestamente, formaban las capas inferiores del manto. Los minerales predominantes en cada capa otorgan a la misma su nombre correspondiente: en el manto superior se habla de las capas de olivino, espinela modificada y espinela. A partir de los 660 kilómetros, el componente principal de la roca es una forma densa del silicato de magnesio ($MgSiO_3$) perteneciente a la gran familia de cristales denominados perovskitas. En general, las perovskitas consisten en una distribución de aniones de oxígeno junto a dos tipos de cationes (en este caso, magnesio y silicio). Exhiben gran variedad de composiciones que incluyen superconductores y otros materiales empleados con frecuencia en electrónica, como en condensadores o actuadores piezoeléctricos.

El silicato de magnesio de tipo perovskita fue sintetizado por primera vez en 1974 a una presión de 30 gigapascal. (Un gigapascal equivale a unas 10.000 veces la presión atmosférica a nivel del mar.) Durante los treinta años siguientes, la comunidad científica se convenció de que ese mineral debía estar presente en todo el manto, sin experimentar ninguna transición de fase hasta la frontera con el núcleo, a 2890 kilómetros de profundidad.

Sin embargo, desde el decenio de los sesenta se conocía la existencia de cierta anomalía sísmica a unos 2600 kilómetros. El manto inferior, hasta entonces denominado capa D, fue dividido en dos subcapas: D' y D''. La subcapa D'' hacía referencia a los 300 kilómetros más profundos del manto.

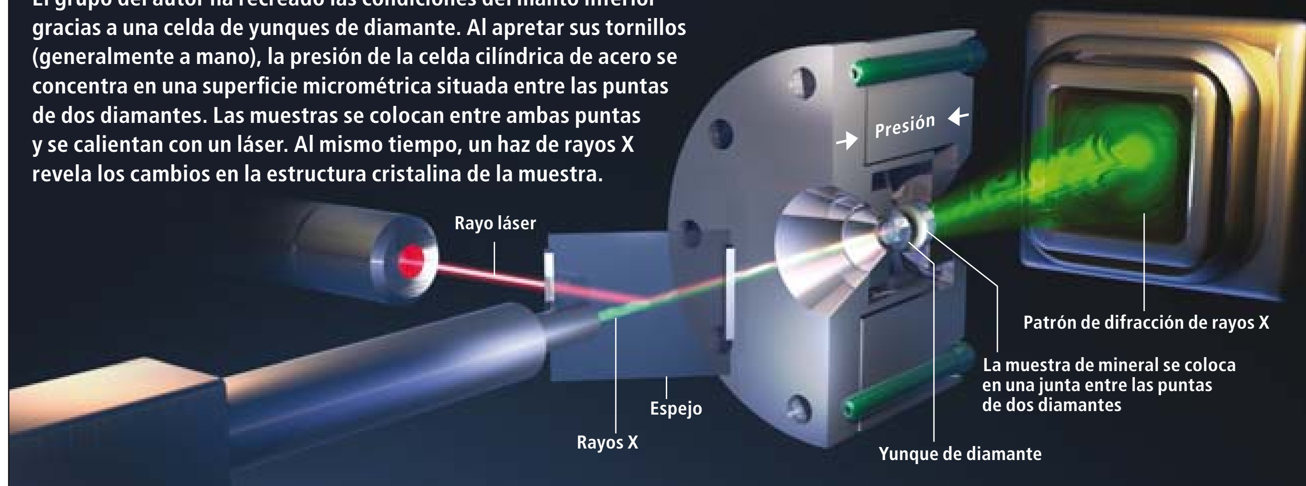
En 1983 se descubrió que la "anomalía" correspondía a una discontinuidad. Sin embargo, el hecho se atribuyó a un cambio en la abundancia relativa de los elementos y no a la existencia de una frontera que separase dos estados de fase. Tal hipótesis se basaba en parte en la estructura cristalina de la perovskita, considerada "ideal": los átomos se ordenan según una disposición geométrica tan compacta que, aparentemente, maximizan la cantidad de masa por unidad de volumen.

Ello puso en duda que la perovskita pudiera comprimirse aún más. Sin embargo, la suposición de un cambio en la abundancia de los elementos también resultaba problemática: en principio, la convección remueve el manto inferior y mezcla sus componentes con los de las capas superiores; a la larga, ello implica una uniformidad en los tipos y proporciones de los elementos.

Pero resolver la cuestión requería realizar experimentos a más de 120 gigapascal y a 2500 kelvin. Con el objetivo de afrontar tal reto, a finales del decenio de los noventa nues-

LA TIERRA PROFUNDA EN EL LABORATORIO

El grupo del autor ha recreado las condiciones del manto inferior gracias a una celda de yunques de diamante. Al apretar sus tornillos (generalmente a mano), la presión de la celda cilíndrica de acero se concentra en una superficie micrométrica situada entre las puntas de dos diamantes. Las muestras se colocan entre ambas puntas y se calientan con un láser. Al mismo tiempo, un haz de rayos X revela los cambios en la estructura cristalina de la muestra.



tro grupo comenzó a realizar experimentos con una celda de yunques de diamante, un dispositivo que permite someter materiales a presiones muy elevadas. Para ello, se coloca la muestra entre dos diamantes naturales de alta calidad gema (de unos dos décimos de quilate); después, se calienta con un láser.

Sin embargo, cuando se superan los 80 gigapascal, incluso el diamante (el material más duro que se conoce) se deforma, por lo que, si se desea aumentar aún más la presión, es necesario optimizar la forma de las puntas de los yunques de diamante para evitar que se quiebre. Durante nuestros experimentos, los diamantes se fracturaron en numerosas ocasiones. Por fin, gracias al uso de yunques biselados, en 2001 conseguimos superar el umbral de los 120 gigapascal. Nuestro laboratorio fue uno de los primeros del mundo en conseguirlo y el primero en estudiar en la perovskita los efectos de presiones tan elevadas.

Claro como el cristal

Para comprender lo que ocurría en el interior de las muestras, trasladamos nuestros experimentos a SPring-8, el mayor sincrotrón de rayos X del mundo, situado en las montañas occidentales de Japón. Desde hace casi un siglo, la estructura cristalina de los minerales se estudia a partir de los patrones de difracción que dejan los rayos X al atravesarlos. Ello se debe a que las distancias interatómicas y las longitudes de onda de los rayos X son del mismo orden de magnitud. Los haces de rayos X de SPring-8, muy colimados y de gran intensidad, permiten registrar patrones de gran calidad en intervalos de tan sólo un segundo, algo que resulta de gran utilidad cuando se desea estudiar el cambio en la estructura cristalina bajo condiciones extremas.

Un día de invierno de 2002, mi estudiante Motohiko Murakami me comunicó que el patrón de difracción de la perovskita había cambiado drásticamente tras alcanzar presiones de 125 gigapascal. Los cambios en el patrón de difracción suelen indicar una modificación de la estructura cristalina. Justo lo que estábamos buscando. De ser correcto, el descubrimiento podía convertirse en uno de los más importantes en mineralogía de altas presiones y quizás en uno de los más relevantes de todas las disciplinas que estudian el interior de la Tierra desde 1974, fecha en que el silicato de magnesio de tipo perovskita fue sintetizado por primera vez.

No obstante, en un primer momento tomamos los datos con cautela, ya que los patrones de difracción pueden variar por distintas razones. Las muestras pueden reaccionar con el material que soporta el yunque (arcilla, normalmente) y provocar un cambio radical en el patrón de difracción. Días después, al comentar nuestras observaciones con otros compañeros, su primera reacción fue bastante escéptica. Argumentaron que la perovskita se trataba de una estructura ideal, muy compacta y en la que nunca se había observado una transición de fase hacia otra estructura más densa.

Repetimos los experimentos numerosas veces. En todos los casos obtuvimos el nuevo patrón de difracción, un resultado sin duda alentador. Pero la indicación definitiva llegó al descubrir que, al recocer la muestra a bajas presiones, el patrón retornaba al de la perovskita original. La transición de fase era reversible, lo que excluía la posibilidad de que el cambio en el patrón de difracción se debiese a una modificación en la composición de la muestra. Fue entonces cuando nos convencimos de que habíamos transformado

El autor

Kei Hirose se licenció en geología en la Universidad de Tokio. Actualmente es profesor de geología de altas presiones en el Instituto de Tecnología de Tokio. Su investigación se centra en la generación en laboratorio de presiones y temperaturas elevadas, con especial interés en el dominio profundo de la Tierra y los materiales planetarios.

ALFRED T. KAMAJIAN

el silicato de magnesio de tipo perovskita en una nueva estructura.

Más adelante descubrimos que, a una temperatura de 2500 kelvin, el cambio ocurría a 120 gigapascal (en lugar de a 125): exactamente la presión que corresponde a una profundidad de 2600 kilómetros, donde se había detectado la misteriosa discontinuidad en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas. Ello aclaraba el enigma. Habíamos descubierto una transición de fase de la perovskita y, con ella, el material que debía predominar en la capa D''. Además, quizá las propiedades de aquella nueva fase implicasen consecuencias de calado para la dinámica del manto.

No obstante, antes de continuar con nuestra investigación debíamos determinar la estructura cristalina de la nueva fase. Ello suponía un reto, dado que hasta entonces no se habían observado cambios de fase inducidos por presión en ningún cristal del tipo de la perovskita. Estuvimos revisando los catálogos de cristalografía durante casi un año con el objetivo de encontrar un patrón de difracción que se ajustara a nuestros datos. Algo parecido a buscar una aguja en un pajar, ya que existen decenas de miles de estructuras cristalinas.

A finales de 2003, nuestro colaborador Katsuyuki Kawamura realizó una simulación por ordenador con átomos de magnesio, silicio y oxígeno a altas presiones. Empezó con una distribución aleatoria de átomos a temperaturas muy elevadas; conforme se enfriaba la muestra virtual, comenzó a cristalizar. Después calculó los patrones de difracción que tendría que producir la nueva estructura. El resultado encajaba perfectamente con el patrón que habíamos obtenido en nuestros experimentos.

Bautizamos aquella nueva fase con el nombre de *postperovskita* (en realidad no se trata de un mineral, puesto que aún no ha sido encontrado en la naturaleza). Su estructura resulta ser casi idéntica a la de dos cristales conocidos: el trisulfuro ferroso de uranio ($FeUS_3$) y el iridato de calcio ($CaIrO_3$), ambos estables a presión y temperatura ambientes. Además, nuestros experimentos demostraron que la densidad de la postperovskita es entre un 1 y 1,5 por ciento mayor que la de la perovskita.

Una cuestión candente

Desde que anunciamos nuestros resultados en 2004, investigadores de distintas disciplinas los han ampliado hasta construir una nueva imagen de la gran variedad de procesos que tienen lugar en el interior de la Tierra.

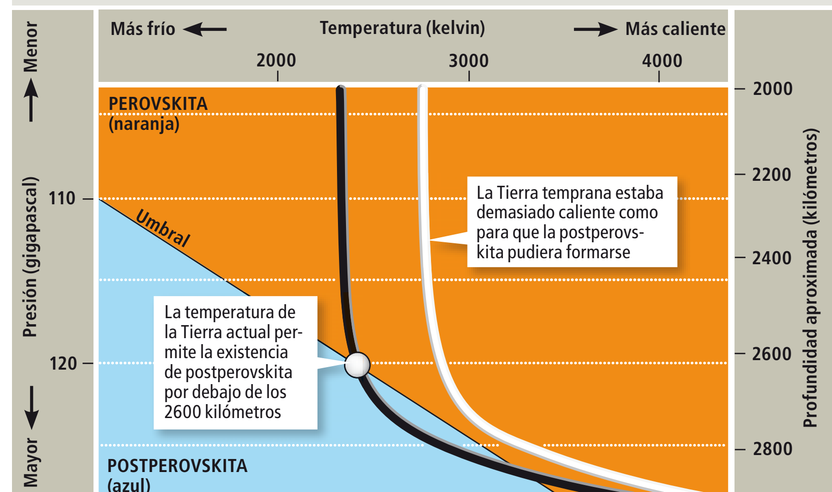
En primer lugar, nuestro descubrimiento ayuda a entender la transferencia de calor del núcleo al manto. El núcleo consta en su mayor parte de hierro, por lo que es dos veces más denso que el manto. En consecuencia, el manto y el núcleo apenas se mezclan y el calor se transmite sobre todo por conducción. Aunque el manto es rico en uranio, torio y potasio radiactivos, se cree que el núcleo cuenta con pocos isótopos radiactivos. Ello implica que su temperatura actual (probablemente, entre 4000 y 5000 kelvin) procede sobre todo del calor remanente de las etapas de formación de la Tierra. Desde entonces, el núcleo se ha enfriado poco a poco conforme el calor ha ido escapando a través de la interfase núcleo-manto.

A partir de suposiciones plausibles sobre la conductividad térmica de los materiales que componen el manto inferior, nuestro grupo estimó que el flujo de calor desde el núcleo hacia el manto debía ascender a cinco o diez terawatt (equiparable a la potencia media de todas las centrales eléctricas del mundo). Se trata de un flujo de energía mayor de lo que se pensaba y, por tanto, de una tasa de enfriamiento del núcleo más rápida. Para que el núcleo haya podido alcanzar su temperatura actual, su temperatura inicial tuvo que ser, pues, mayor de lo que se creía hasta hace poco.

El flujo térmico ha determinado la evolución del núcleo desde la formación de la Tierra. Al principio, la totalidad del núcleo se hallaba en estado líquido. En cierto momento su parte interna comenzó a cristalizar, motivo por el que hoy en día el núcleo presenta dos capas: un núcleo interno, sólido, y un núcleo externo, aún en estado líquido. Una mayor velocidad de enfriamiento sugiere que el núcleo interno sólido cuenta con una antigüedad in-

No se creía que los minerales conocidos del manto pudiesen comprimirse aún más

LOS DATOS EXPERIMENTALES que indican las presiones y temperaturas a las que la perovskita se transforma en postperovskita (*línea umbral*) indican que el perfil de temperaturas de la Tierra actual (*curva negra*) permite la existencia de postperovskita entre los 2600 y los 2900 kilómetros de profundidad. Por el contrario, las temperaturas de la Tierra temprana (*curva blanca*) eran demasiado altas para posibilitar la formación de postperovskita.

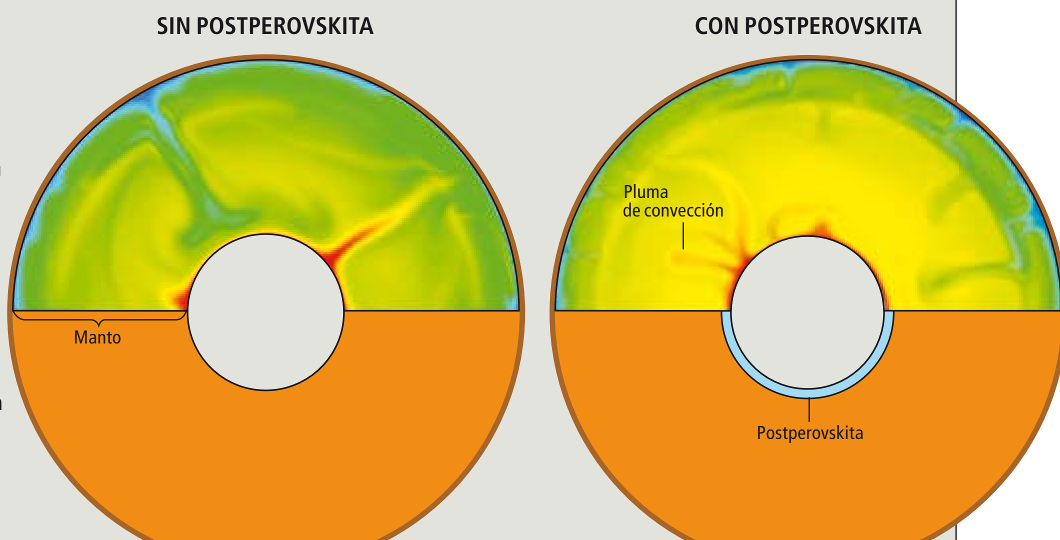


JEN CHRISTIANSEN

CONVECCION A GRAN ESCALA

Las simulaciones han demostrado que, en presencia de postperovskita, la convección es más rápida y caótica (*derecha*) que si el manto estuviera formado exclusivamente por perovskita (*izquierda*), tal y como ocurría en la Tierra temprana. Las plumas de convección comienzan su ascenso por encima del núcleo caliente. A medida que la pluma asciende, la postperovskita de su interior penetra en zonas de menor presión y se transforma en perovskita, menos densa. La consecuente expansión hace que la pluma sea más ligera y ascienda de forma más rápida y caótica que en un manto compuesto sólo por perovskita.

Frío — Caliente



DE "EFFECTS OF A PEROVSKITE-POST PEROVSKITE PHASE CHANGE NEAR CORE-MANTLE BOUNDARY EN COMPRESSIBLE MANTLE CONVECTION", POR T. NAKAGAWA Y P. J. TACKLEY, EN *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 31; 2004

ferior a los mil millones de años, una edad joven comparada con los 4600 millones de años de la Tierra. Si fuese más antiguo, una tasa de enfriamiento más rápida hubiera supuesto un tamaño superior al observado hoy día.

La formación del núcleo interno tiene consecuencias sobre el geomagnetismo, que, a su vez, afecta a la vida sobre la Tierra. Se cree que la convección del metal fundido del núcleo externo genera, mediante un efecto de dinamo, el campo magnético del planeta. La presencia de un núcleo interno sólido provoca una convección menos caótica y, por tanto, un campo más intenso. El campo geomagnético protege a la Tierra del viento solar y de los rayos cósmicos, que, sin dicha protección, causarían mutaciones genéticas y resultarían nocivos para la vida sobre la superficie terrestre. El posible cambio de intensidad que el campo magnético experimentó hace unos mil millones de años habría permitido la expansión de la vida desde el mar hacia tierra firme.

La presencia de postperovskita no sólo afecta a la difusión térmica a través de la interfase núcleo-manto, sino también al flujo de calor en la totalidad del manto. Este descubrimiento arroja luz sobre la historia del planeta. Justo sobre la interfase entre el núcleo y el manto se generan las "plumas del manto", flujos ascendentes de roca caliente. A medida que una pluma con postperovskita asciende, la presión disminuye hasta alcanzar las condiciones en las que la postperovskita se transforma en perovskita, de menor densidad. Ello aumenta el volumen de la pluma, que, al ser menos densa que el material frío circundante, flota con mayor facilidad y asciende aún más.

Las simulaciones por ordenador muestran que, en presencia de postperovskita, las plumas se forman con mayor frecuencia y su trayectoria se torna más serpenteante que si todo el manto se hallase compuesto sólo por perovskita (*véase el recuadro* "Convección a gran escala"). De hecho, los cálculos indican que la postperovskita habría acelerado el flujo térmico en el manto en un 20 por ciento.

Agitación térmica

Una mayor convección en el manto implica un aumento de centenas de grados en la temperatura del manto superior y, por tanto, una mayor actividad volcánica. En los primeros estadios de la evolución terrestre, las temperaturas del núcleo y del manto inferior eran tan elevadas que impedían la formación de postperovskita. Pero ello implicaba un flujo térmico menor y, paradójicamente, un manto superior más frío que en la actualidad. A medida que la temperatura del planeta descendía, parte de la perovskita comenzó a transformarse en postperovskita. Ello ocurrió hace unos 2300 millones de años. La formación de postperovskita habría incrementado el flujo térmico desde el núcleo y aumentado la temperatura global del manto, con la consecuencia de una tectónica de placas más rápida y una actividad volcánica más intensa. Así, durante los últimos 2300 millones de años, los continentes habrían crecido el doble de rápido que en etapas anteriores. No obstante, esta conclusión sigue hoy sometida a un intenso debate.

Es posible que las propiedades físicas de la capa D'' sean muy diferentes de las del resto del manto. Experimentos recientes han demostrado que la postperovskita tiene una conductividad eléctrica mucho más alta que la perovskita, por lo que la región más profunda del manto contaría con una conductividad varios órde-

Bibliografía complementaria

PEROVSKITAS. Robert M. Hazen en *Investigación y Ciencia*, págs. 46-54; agosto de 1988.

LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, EXPRESION DE SU DINAMICA INTERNA. Michael Gurnis en *Investigación y Ciencia*, págs. 22-29; mayo de 2001.

POST-PEROVSKITE PHASE TRANSITION IN $MGSIO_3$. Motohiko Murakami, Kei Hirose, Katsuyuki Kawamura, Nagayoshi Sata y Yasuo Ohishi en *Science*, vol. 304, págs. 855-858; 7 de mayo de 2004.

DEEP EARTH AND MINERAL PHYSICS. Número especial de *Elements*, vol. 4, n.º 3; junio de 2008.

DEEP MANTLE PROPERTIES. Kei Hirose en *Science*, vol. 327, págs. 151-152; 8 de enero de 2010.

nes de magnitud superior a la esperada. Ello permitiría un mayor intercambio de momento angular entre el núcleo líquido y el manto sólido cada vez que se produce un cambio en los patrones de flujo del núcleo (tales transferencias de momento angular se deben a la fuerza de Lorentz, por lo que se ven favorecidos en presencia de una capa intermedia de conductividad elevada).

De acuerdo con las simulaciones realizadas por otros expertos, dichas modificaciones en la dinámica de rotación del planeta explican las variaciones de milisegundos en la duración del día que se observan cada diez años. También explicarían las oscilaciones periódicas que se superponen al movimiento de precesión del eje de la Tierra (nutación).

A pesar de que, en la Tierra, la capa de postperovskita se limita a unos pocos centenares de kilómetros del manto inferior, en otros planetas podrían existir grandes regiones de este mineral. Según los cálculos teóricos, el $MgSiO_3$ de tipo postperovskita es estable hasta alcanzar los 1000 gigapascal y los 10.000 grados kelvin, condiciones en las que se disocia en dióxido de silicio y óxido de magnesio. Es de esperar que la postperovskita constituya el componente principal de los núcleos rocosos de Urano y Neptuno. Por el contrario, los núcleos de Júpiter y Saturno, rodeados de densas capas de hidrógeno, se encuentran a presiones y temperaturas demasiado elevadas como para contener postperovskita estable.

¿Qué ocurre con los planetas de otros sistemas solares? Todos los exoplanetas observados hasta el momento han resultado ser mayores que nuestro planeta. Se cree que aquellos con masas inferiores a diez veces la masa de la Tierra probablemente sean planetas rocosos similares al nuestro ("supertierras"). De hecho, las observaciones astronómicas parecen indicar que muchos de ellos presentan una composición semejante a la terrestre. La postperovskita bien podría ser el elemento más abundante en un planeta similar al nuestro pero con elevadas presiones y temperaturas internas.

Continuará

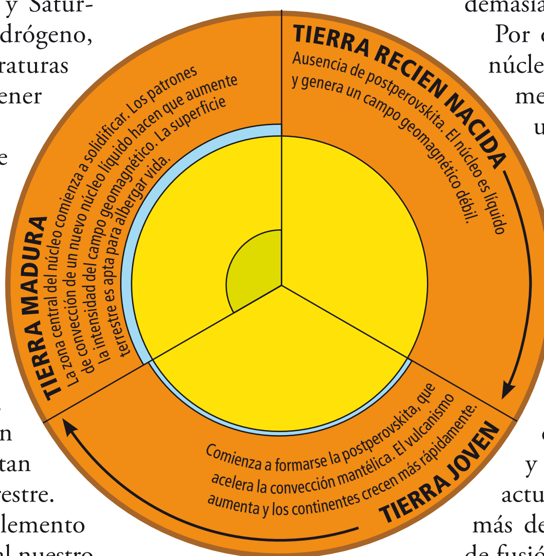
Quedan todavía preguntas por resolver acerca de la estructura de la capa D''. Durante largo tiempo se han venido observado anomalías notables en la velocidad de las ondas sísmicas a esta profundidad. De hecho, parece como si la capa D'' no fuese del todo uniforme, sino como si contase con dos irregularidades localizadas, a grandes rasgos, bajo Africa y bajo el océano Pacífico. ¿Podría tratarse de dos masas más densas que la roca circundante, pero lo bastante ligeras como para flotar sobre el núcleo, de modo parecido a como los continentes flotan sobre el manto superior? Tales "continentes subterráneos" podrían influir en los flujos de la parte inferior del manto y, de forma indirecta, en los patrones de convección del manto en su totalidad y en la tectónica de placas de la superficie. ¿Cómo se formaron y crecieron estas masas? ¿Podría estar relacionada la masa situada bajo el océano Pacífico con la pluma de manto que genera el archipiélago de Hawai? Quizás en un futuro no muy lejano hallemos respuestas a estas preguntas.

La región más profunda del manto se ha considerado enigmática durante mucho tiempo. Ahora, muchas de sus características pueden explicarse gracias al descubrimiento de la postperovskita. Sin embargo, nuestro conocimiento del núcleo metálico, rico en hierro, es aún deficiente. El núcleo ha resultado siempre más difícil de estudiar que el manto, ya que, hasta hace poco, la técnica de los yunques de diamante no lograba recrear sus condiciones de presión y temperatura. Aunque se han conseguido presiones superiores mediante el método de compresión por ondas de choque, las temperaturas obtenidas resultan demasiado altas.

Por otra parte, desde 1952 se sabe que el núcleo externo, líquido, es un 10 por ciento menos denso que el hierro puro o que una aleación de hierro y níquel. Ello indicaría la presencia de uno o varios elementos más ligeros (como azufre, oxígeno, carbono o hidrógeno), pero su identificación es aún objeto de debate. Los cálculos más aproximados de la temperatura del núcleo se obtienen a partir de las temperaturas de fusión de distintas aleaciones de hierro a las presiones características de la interfase entre el núcleo sólido y líquido. Sin embargo, las estimaciones actuales presentan una incertidumbre de más de 2000 kelvin, ya que la temperatura de fusión depende en gran medida de la composición exacta, la cual es desconocida. Se ignora también la estructura cristalina del hierro en condiciones equivalentes a las del núcleo interno, lo que dificulta la interpretación de los datos sísmicos. No obstante, en fecha reciente hemos diseñado yunques de diamante que abarcan el rango de presiones y temperaturas del núcleo terrestre. Ello abrirá una puerta hacia la comprensión de los misterios de la región más profunda de nuestro planeta. Sería como un viaje al centro de la Tierra. Al menos, en nuestra imaginación.

LA EVOLUCION DEL MANTO Y EL NUCLEO

Cuando la Tierra se formó, el manto no contenía postperovskita y el núcleo, caliente y rico en hierro, era totalmente líquido. Dada la poca capacidad del manto para disipar el calor, el interior de la Tierra fue enfriándose muy lentamente (*Tierra recién nacida*). Hace unos 2300 millones de años, la formación de postperovskita en la parte inferior del manto aceleró la convección. Este cambio en la dinámica terrestre habría aumentado la actividad volcánica y, con ello, el crecimiento de los continentes (*Tierra joven*). La consecuente aceleración del transporte de calor enfrió el núcleo lo suficiente como para que, hace unos 1000 millones de años, se formase el núcleo interno sólido (*Tierra madura*). Los patrones de convección en el núcleo externo líquido se volvieron más regulares y comenzaron a generar un intenso campo geomagnético que protege la superficie de la Tierra del peligro del viento solar y los rayos cósmicos. Ello pudo haber permitido que la vida saltara a tierra firme.



JEN CHRISTIANSEN



BOTOX FALSIFICADO, UNA AMENAZA REAL

El mercado en auge de un producto de belleza falsificado podría poner en manos de cualquiera un arma biológica mortal

Ken Coleman y Raymond A. Zilinskas

En Arizona, a principios de 2006, Chad Livdahl, que se autodenominaba médico naturópata, fue declarado culpable de fraude postal y electrónico, de falsificar la marca de un producto farmacéutico y de cometer fraude contra el gobierno de los Estados Unidos. Fue sentenciado a nueve años de prisión. Zarah Karim, su esposa y socia en la empresa Toxin Research Internacional, Inc., en Tucson, fue declarada culpable de los mismos cargos y condenada a seis años de prisión. Ambos tuvieron que pagar indemnizaciones y multas elevadas porque, según la acusación, se embolsaron al menos 1,5 millones de dólares en poco más de un año vendiendo pequeños viales de Botox falsificado a médicos de todo el país.

Botox, que se inyecta en dosis muy pequeñas para suavizar las líneas de expresión o relajar los espasmos musculares, dista mucho de ser el único producto que inspira una fabricación y un comercio fraudulentos. El comercio mundial de productos farmacéuticos falsificados mueve cada año unos 75.000 millones de dólares. Pero el principio activo de Botox y otras sustancias relacionadas difiere en gran medida de los constituyentes de otros productos farmacéuticos: en su forma pura, representa la sustancia más mortífera que conoce la ciencia. Se trata de la neurotoxina botulínica (NTB), que forma parte de las armas biológicas con un mayor potencial de letalidad; comparte el estatus de "agente peligroso" con los patógenos que causan la viruela, el carbunco (o ántrax maligno) y la peste. Su posible uso como arma biológica hace que la existencia de laboratorios ilegales donde se produce la toxina y de oscuros traficantes que la venden por todo el mundo esté causando más alarma que cualquier otro fraude farmacéutico.

Los autores, en calidad de analistas de seguridad, empezaron hace dos años a explorar las dimensiones y la naturaleza de ese mercado global ilegal. Su conclusión resulta preocupante: un arma mortífera de destrucción en masa, antes relativamente inaccesible, se está convirtiendo en algo tan fácil de obtener o fabricar como una bomba de fabricación casera. Para reducir esa amenaza, proponen una serie de medidas que no son caras ni comportan riesgos.

Un mercado con muchas facetas

Desde que, en 1989, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) concedió a la empresa Allergan, de Irvine (California), los permisos para que pudiese vender Botox para uso médico, la empresa se ha hecho con la mayor parte del mercado legal de los productos con la toxina botulínica; en 2009, sus ventas ascendieron a unos 2000 millones de dólares. No obstante, otros fabricantes de productos legales a base de NTB, sobre todo Ipsen (Francia), Merz Pharma (Alemania) y el Instituto Lanzhou de Productos Biológicos (China), están también avanzando en el mercado; en algunos países incluso superan las ventas de Allergan. La FDA aprobó la aplicación cosmética de la NTB en 2002. En la actualidad, sólo siete empresas en todo el mundo poseen el permiso para fabricar toxina botulínica de calidad farmacéutica para tratar personas. Muchas otras compañías, entre

CONCEPTOS BASICOS

- La demanda de productos falsificados que contienen neurotoxina botulínica puede estar alimentando la proliferación de fabricantes no autorizados de la toxina.
- La toxina botulínica es un veneno mortal que puede utilizarse como arma biológica.
- Los fabricantes no autorizados podrían vender la toxina a terroristas o utilizarla ellos mismos con fines subversivos.
- Los científicos y los agentes del orden público podrían unirse para evaluar el alcance del problema, antes de acometer la lucha contra los falsificadores.

THE HEADS OF STATE

ellas tres de los EE.UU., proporcionan a los laboratorios la toxina botulínica de calidad analítica, que no ha sido aprobada para uso humano y sólo puede emplearse para aplicaciones industriales y científicas, como la investigación en vacunas.

Los productos falsificados a veces llevan etiquetas poco claras para que sean confundidos con la marca farmacéutica auténtica o, más a menudo, llevan un nombre parecido, como "Butox" o "Beauteous". Los hay que son falsificaciones en todos los sentidos: no contienen NTB en cantidades detectables. Pero el año pasado, un estudio publicado por Andy Pickett y Martin Mewies, de Pisen, reveló que casi el 80 por ciento de los productos ilegales con NTB contenían algo de toxina, aunque en cantidades muy variables. Los principales compradores de esos productos, que suelen venderse más baratos que las versiones legítimas, eran médicos y cosmetólogos sin escrúpulos que los compraron a fabricantes ilegales o a intermediarios, a menudo a través de Internet, con la intención de embolsarse la diferencia de precio. Los productores genuinos estiman que ese mercado ilícito les supone una pérdida anual de centenares de millones de dólares.

Puede que el consumidor de los productos falsificados llegue a pagar un precio aún mucho mayor, como ilustra un incidente ocurrido en Florida en 2004. Unos viales de NTB cosmética falsificada llevaron a cuatro personas al hospital, donde permanecieron durante meses al borde de la muerte, gravemente enfermos de botulismo y con necesidad de ventilación asistida. Un médico que había sido suspendido del ejercicio de la profesión compró NTB a un fabricante con licencia para producir la toxina de calidad analítica, y luego inyectó una sobredosis a tres pacientes y a sí mismo. No se sabe exactamente cuánta toxina recibió cada persona, pero el médico cometió el grave error de confundir las unidades (una unidad de NTB equivale a 4,8 nanogramos o 4,8 milmillonésimas de gramo) con microgramos (µg) o millonésimas de gramo.

Ese no es el único caso de venta ilegal para uso humano de material de calidad analítica. Algunos datos indican que se ha llegado a robar o desviar hacia el mercado negro NTB de calidad farmacéutica que era legal. No obstante, la gran mayoría de los productos falsificados tienen una procedencia desconocida, principalmente en Asia, y son ofrecidos por vendedores fuera de la ley que en algunos casos también preparan sus propios ingredientes.

Solamente en China localizamos 20 entidades —supuestas empresas— que en su sitio web se definían como proveedores "certificados" de NTB y ponían a la venta productos cosméticos. A menudo las direcciones indicadas en su web no existían o correspondían a pequeñas oficinas que aparentemente servían de tapaderas. Cualquiera que fuera su naturaleza, esas organizaciones tenían acceso a la toxina botulínica genuina, como han demostrado los análisis realizados por Ipsen.

La elaboración de productos con NTB falsificada se ha extendido también por los países de la antigua Unión Soviética. En ello pueden estar implicados grupos criminales. Los productos farmacéuticos falsificados son un problema corriente en Rusia desde hace algún tiempo; se calcula que un 90 por ciento de las clínicas rusas de cosmetología usan de vez en cuando productos con NTB falsificada. Un especialista en seguridad nos habló de un proveedor que lleva trabajando en Rusia más de tres años. El origen de esos productos se encuentra en algún lugar de Chechenia; su representante viaja regularmente en avión a San Petersburgo con maletas llenas de viales con etiquetas casi idénticas a las de los envases de Botox legítimo. Cuando un cliente preguntó al representante qué cantidad de producto podía venderle, se dice que éste le respondió que podía proporcionarle cualquier cantidad, incluso 1000 viales.

Existe el peligro de que los fabricantes de medicamentos falsos de la India entren pronto en el negocio de la NTB —si no lo han hecho ya—. Ese país cuenta con un fabricante autorizado de un producto con NTB llamado BOTOGenie, que salió al mercado en 2007, y un mercado interior fuerte tanto para los productos cosméticos con NTB como para los de uso terapéutico. La industria india de turismo médico destinada a los extranjeros que buscan tratamientos baratos también se está expandiendo rápidamente; es probable que ello atraiga a las bandas de falsificadores de productos farmacéuticos.

Desde la perspectiva de la seguridad, ese mercado en auge constituye un problema. Para quienes elaboran o distribuyen el producto sólo hay un pequeño paso entre la venta de productos falsificados de NTB para uso cosmético y la venta de la misma toxina en grandes cantidades con fines subversivos. En realidad, como ilustra el ejemplo ruso, esa distinción ya es ahora confusa. Es muy difícil evitar que falsificadores y criminales monten instalaciones con dicha finalidad, porque para fabricar la toxina botulínica no se necesita un equipo de laboratorio especial ni una gran experiencia en microbiología.

Fácil de fabricar, difícil de utilizar

Clostridium botulinum, la bacteria que produce la NTB, se encuentra de manera natural en el

SOLO UN PEQUEÑO PASO SEPARA LA VENTA DE PRODUCTOS FALSIFICADOS DE LA VENTA MASIVA DE LA TOXINA

UN VENENO POTENTE

La neurotoxina botulínica, principal constituyente de Botox y de otros fármacos relacionados, es la sustancia más mortífera del mundo. Una sola molécula de toxina puede paralizar una célula nerviosa. Basta una milmillonésima de gramo (ng) para matar un ratón.

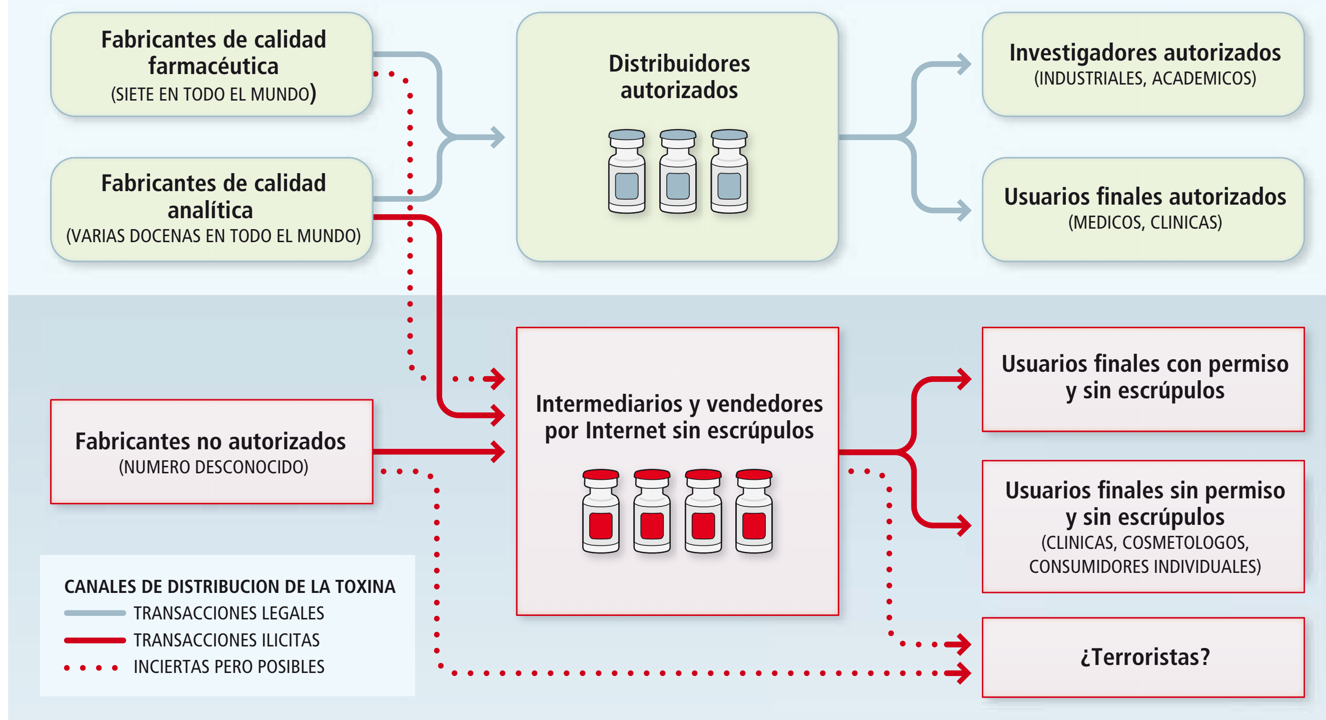
DOSIS LETAL PARA UN RATON
1,2 ng

DOSIS LETAL PARA UNA PERSONA DE 70 KILOS:
0,09–0,15 µg (por inyección)
0,70–0,90 µg (por inhalación)
70 µg (por vía oral)

1 GRAMO PODRIA SER LETAL PARA:
- 14.285 personas (por vía oral)
- 1,25 millones de personas (por inhalación)
- 8,3 millones (por inyección)

CLAVES
Nanogramo (ng) = una milmillonésima de gramo
Microgramo (µg) = una millonésima de gramo
Miligramo (mg) = una milésima de gramo

13PT



suelo, pero es anaeróbica, es decir, sólo vive en ausencia de oxígeno. En el pasado, la principal causa de envenenamiento por la toxina botulínica (botulismo) eran los productos alimentarios enlatados no esterilizados o estropeados. Hoy en día, la forma más frecuente en adultos es el botulismo de las heridas; la padecen principalmente los drogadictos que se infectan con *C. botulinum* al inyectarse la droga.

La toxina pura producida por el microorganismo es, por sí misma, el veneno más potente del mundo. Y la preparación de la cantidad mínima con efectos mortíferos requiere sólo el equipamiento estándar de un laboratorio de biología, presente en cualquier país. En menos de un mes, alguien con la formación equivalente a la licenciatura de biología podría sintetizar toxina suficiente para provocar una destrucción masiva.

Tal es la potencia de la NTB, que se cree que una sola *molécula* de la toxina puede incapacitar una célula nerviosa. Las partículas de la toxina bloquean los receptores de las terminaciones nerviosas, silencian los nervios y paralizan los músculos a su alrededor. Si se inyecta NTB pura en una vena o en un músculo, bastan de 0,09 a 0,15 microgramos (μg) para matar a una persona de setenta kilos.

Los autores

Ken Coleman y **Raymond A. Zilinskas** colaboran con el Centro James Martin de Estudios sobre la No Proliferación, del Instituto de Estudios Internacionales de Monterrey en California. Coleman, que trabajó antes como microbiólogo, es investigador principal del instituto y dirige una empresa de tecnología médica. Zilinskas, que también trabajó como microbiólogo, lidera el programa de no proliferación de armas biológicas y químicas del centro. Durante mucho tiempo fue asesor del gobierno estadounidense y trabajó como inspector de las Naciones Unidas en Irak en 1994.

Aunque la inhalación lleva la toxina al nervio de manera menos eficiente, una cantidad de 0,70 a 0,90 μg de toxina inhalada puede resultar mortal en un adulto. La ingestión de la toxina constituye el método menos eficaz de envenenamiento, para el que se necesitan 70 μg. Dicho de otro modo, un gramo de NTB puede contener más de 14.000 dosis letales por vía oral y unos 1,25 millones de dosis letales por inhalación.

Todas las cepas de *C. botulinum* presentes en la naturaleza pueden generar NTB. Las empresas que la fabrican legalmente utilizan cepas que de manera natural producen mucha más cantidad de toxina. Una en especial, la cepa Hall, es también muy empleada en laboratorios universitarios y se conserva en colecciones de cultivos que poseen diferentes países. Un aspirante a fabricante de la toxina que pudiera obtener esa bacteria aprendería a manipularla sin dificultad, porque las instrucciones se han publicado en numerosas revistas científicas a lo largo de los últimos cincuenta años.

El proceso empieza con una pequeña colonia de *C. botulinum* en suspensión en un medio de cultivo nutritivo corriente a la que se deja multiplicar en un aparato incubador y fermentador durante tres o cuatro días. Esta

13PT

mezcla se saca luego del fermentador y se centrifuga o filtra para separar el líquido que contiene la toxina concentrada. Naturalmente, la industria farmacéutica realiza otros procesos complementarios de purificación para asegurar la calidad y la estabilidad del producto final, que se vende en forma de polvo fino envasado en pequeños viales. Para reconstruir el material, el usuario final añade 10 mililitros de solución salina al vial; el polvo se disuelve en segundos. Este preparado líquido debe emplearse en las siguientes horas, porque pierde potencia muy rápidamente.

La fragilidad de la toxina una vez expuesta al ambiente representó un obstáculo fundamental cuando en el pasado se quiso convertir la NTB en un arma. No obstante, los EE.UU. y la URSS lograron desarrollar armas que dispersaban la NTB en forma de aerosol. Irak desarrolló bombas que contenían NTB, pero seguramente carecían de efecto. El único intento bien documentado del uso de la toxina botulínica como arma, no protagonizado por un gobierno, ocurrió a principios de los noventa. La secta apocalíptica japonesa Aum Shinrikyo (Verdad Suprema), entre cuyos miembros se contaban médicos y otros científicos, intentó varias veces dispersar NTB en forma de aerosol mediante pulverizadores ocultos en carteras de mano. Los ataques fallaron sólo porque la cepa de *C. botulinum* usada producía poca toxina, la boquilla del pulverizador se obstruyó y porque algunos miembros del grupo, arrepentidos, no llegaron a activar sus dispositivos.

El marco hipotético más probable para el uso terrorista de la NTB comprende el sabotaje de alimentos o bebidas. Un estudio publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* en 2005 analizó las estrategias posibles para la introducción de la toxina en puntos clave de la cadena de distribución, desde las vacas hasta los consumidores de leche. El artículo causó polémica porque describía un método de sabotaje que podía funcionar. Sin embargo, los autores no imaginaban que los terroristas que hoy quisiesen realizar un ataque de ese tipo podrían comprar la toxina necesaria para su plan a un proveedor anónimo en Internet, en vez de tener que fabricarla ellos mismos. Su hipotético plan parece ahora mucho más factible.

LA FUNCION SIN IGUAL DE INTERNET DE FACILITAR EL SUMINISTRO Y DIRIGIR LA DEMANDA HACE LA AMENAZA MAS INMEDIATA

Evaluación de la amenaza

Los esfuerzos de la comunidad internacional en materia de seguridad para impedir la proliferación de armas biológicas y químicas se centran normalmente en limitar la demanda. Ejercen presión para que ningún país se dedique a desarrollar armas y restringen el aprovisionamiento mediante un control estricto del tráfico del instrumental y de los conocimientos prácticos necesarios para fabricar dichas armas. Sin embargo, el control de las exportaciones y los tratados como la Convención de 1972 para las Armas Tóxicas y Biológicas o la Convención de 1993 sobre Armas Químicas fueron desarrollados por los gobiernos y a la medida de ellos. La proliferación internacional de productos ilícitos de toxina botulínica crea una situación completamente nueva y desconcertante, porque no son los gobiernos quienes buscan el suministro para fabricar la toxina, sino individuos, y porque tras la demanda de la toxina no hay gobiernos, sino consumidores.

La forma en que Internet facilita el suministro y gestiona la demanda también convierte la proliferación de la toxina botulínica en una amenaza más inmediata que la de cualquier

Cálculo de la escala del problema

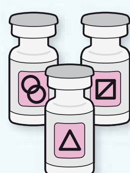
Para empezar a combatir la producción ilegal de NTB, los agentes de orden público podrían unirse con científicos para evaluar el número de fabricantes existente. Los agentes, haciéndose pasar por propietarios de clínicas, podrían encargar el producto a diferentes vendedores en línea ❶. Un análisis de laboratorio podría identificar el "distintivo del producto" propio de cada fabricante ❷. Los distintivos indicarían el número de fabricantes existente y proporcionarían pistas sobre su localización y el origen de la materia prima empleada para fabricar la toxina ❸.



❶ PEDIDO DE PRODUCTOS CON NTB POR INTERNET



FUERZAS DE ORDEN PUBLICO

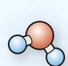


MUESTRAS DEL PRODUCTO

❷ ANALISIS PARA DETERMINAR EL DISTINTIVO DEL PRODUCTO...



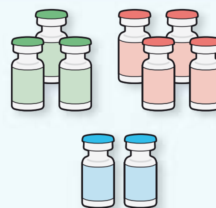
EXAMEN:
ADN: trazas de ADN bacteriano



SUSTANCIAS QUIMICAS: metales y otros elementos traza en el agua y otros compuestos usados en la preparación del fármaco



CONTAMINANTES AMBIENTALES: polen y otras esporas



DISTINTIVOS EXCLUSIVOS DE CADA FABRICANTE

❷ ...QUE REVELAN:

- El número de fabricantes
- La identidad de las cepas bacterianas utilizadas para obtener la toxina
- Pistas sobre el origen geográfico, a partir del agua y de los restos ambientales
- Posibles proveedores de compuestos químicos usados como materia prima

otra arma biológica o química. Nuestro estudio documentó un aumento notable del número de vendedores a través de Internet en los últimos dos años. Sin embargo, la posibilidad de que ese ascenso se corresponda con el de los fabricantes de NTB ilegal no ha despertado demasiada atención entre las agencias encargadas de luchar contra el bioterrorismo o de suprimir el mercado de productos farmacéuticos falsificados. Las dos jurisdicciones parecen haberse olvidado del problema.

Es más, algunas estrategias tradicionales para la prohibición de armas seguramente resultarán ineficaces contra esta nueva amenaza. Modificar en la ecuación la parte del suministro limitando el instrumental o la información, no logrará detener a quienes aspiran a fabricar la NTB, ya que los materiales corrientes que se necesitan para producir la toxina y la bacteria se encuentran por todas partes.

Reducir la demanda de producto falsificado quizá desanime a los fabricantes no autorizados. Hay productores de la toxina de calidad farmacéutica que están utilizando técnicas avanzadas para el etiquetado, como hologramas o números de serie comprobables; los médicos y los cosmetólogos pueden asegurarse así de la autenticidad de los productos comprados. Para educar a los usuarios finales sobre el peligro de los productos falsos, los investigadores de Pisen también han difundido parte de sus análisis de los productos falsos mediante conferencias, participaciones en congresos y artículos científicos.

Allergan ha tomado medidas discretas y selectivas para detener las falsificaciones, entre ellas la colaboración con investigadores de China para clausurar un centro de fabricación ilícita de NTB en la provincia de Shanxi. No obstante, dado que hay muchos laboratorios de NTB no autorizados, y que su número sigue en aumento, las empresas no disponen de la experiencia, recursos y autoridad necesarios para localizar y denunciar a todos esos delincuentes.

Otro ejemplo sobre la falsificación de un fármaco puede ofrecer un enfoque más eficaz. Hace pocos años el artesunato, un antimalárico, fue objeto de un fuerte mercado de falsificaciones. En 2007, entre un tercio y la mitad de todo el artesunato vendido en el sudeste asiático correspondía a un producto falsificado, la mayor parte sin ninguna eficacia terapéutica. Como consecuencia, además de ocasionar pérdidas económicas a los fabricantes legales de artesunato, las víctimas de la malaria fallecían y la enfermedad se fue propagando porque numerosos pacientes no recibían el tratamiento adecuado. Aquel mismo año, se acometió una operación internacional cooperativa (Operación Júpiter) con la finalidad de suprimir ese mercado de artesunato falsificado. Participaron en la ofensiva representantes del Welcome Trust británico, la Interpol, la policía montada de Canadá, la Administración Australiana de Productos Terapéuticos, la División de la Propiedad Intelectual del Ministerio de Seguridad Pública de China, la Organización Mundial de la Salud, los Centros de Prevención y Control de Enfermedades de los Estados Unidos y otras agencias más pequeñas, así como varias organizaciones no gubernamentales.

La Operación Júpiter aporta numerosas lecciones para la supresión de otros medicamentos falsificados. Una de las actividades más destacadas que se llevaron a cabo fue la recolección de cientos de muestras de artesunato falsificado que se vendía en cinco localidades de Camboya, Laos, Myanmar (Birmania), Tailandia y Vietnam. Las muestras se llevaron a laboratorios de referencia de alta calidad y se analizaron para obtener el "distintivo del producto". A partir de esos perfiles únicos de las muestras se dedujo el número de productores de artesunato que operaban fuera de la ley en aquellos países. La información permitió a los agentes de orden público identificar a varios fabricantes que vendían el producto a los intermediarios y determinar las líneas generales de las redes de distribución. De ese modo, se localizaron al menos algunos de los productos falsificados en el sur de China y la policía terminó con la operación delictiva en aquella zona.

Convencer a los gobiernos para que unan sus esfuerzos en la lucha contra la producción de toxina botulínica falsificada no es tarea fácil. Con todo, la Operación Júpiter ofrece un ejemplo de enfoque científico para empezar a comprender el alcance del problema. Bastaría que las agencias de orden público realizasen un primer paso estableciendo clínicas falsas para comprar productos ilícitos con NTB; entonces los análisis de laboratorio podrían indicar cuántos fabricantes trabajan sin autorización. Los datos se utilizarían luego para perseguir a los delincuentes o, en el caso de un ataque, identificar el posible origen de la toxina.

Existen un sinnúmero de amenazas posibles a la seguridad pública. Sin embargo, sólo unos pocos agentes químicos o biológicos son de destrucción masiva y ninguno es tan fácil de obtener como la NTB, debido a su elaboración ilícita y al mercado ilegal en Internet. La vanidad mueve hoy el lucrativo mercado de la NTB falsificada, pero sería ingenuo suponer que las mentes subversivas no se hayan dado cuenta de la oportunidad de ese negocio floreciente.



CORTESIA DE ALLERGAN, INC.

COMBATIR LAS FALSIFICACIONES

Los hologramas incorporados a los viales de Botox auténtico dificultan la imitación y garantizan a los usuarios finales la legitimidad del envase. Los fabricantes de productos legales con NTB también aplican otros detalles en el envasado para reforzar la seguridad e informar a la población, pero carecen de recursos y autoridad para perseguir a los falsificadores.

Bibliografía complementaria

BOTULINUM TOXIN AS A BIOLOGICAL WEAPON: MEDICAL AND PUBLIC HEALTH MANAGEMENT. Stephen S. Arnon et al. en *Journal of the American Medical Association*, vol. 285, n.º 8, págs. 1059-1070; 28 de febrero, 2001.

BEAUTY AND THE BEAST. Donald Kennedy en *Science*, vol. 295, pág. 1601; 1 de marzo, 2002.

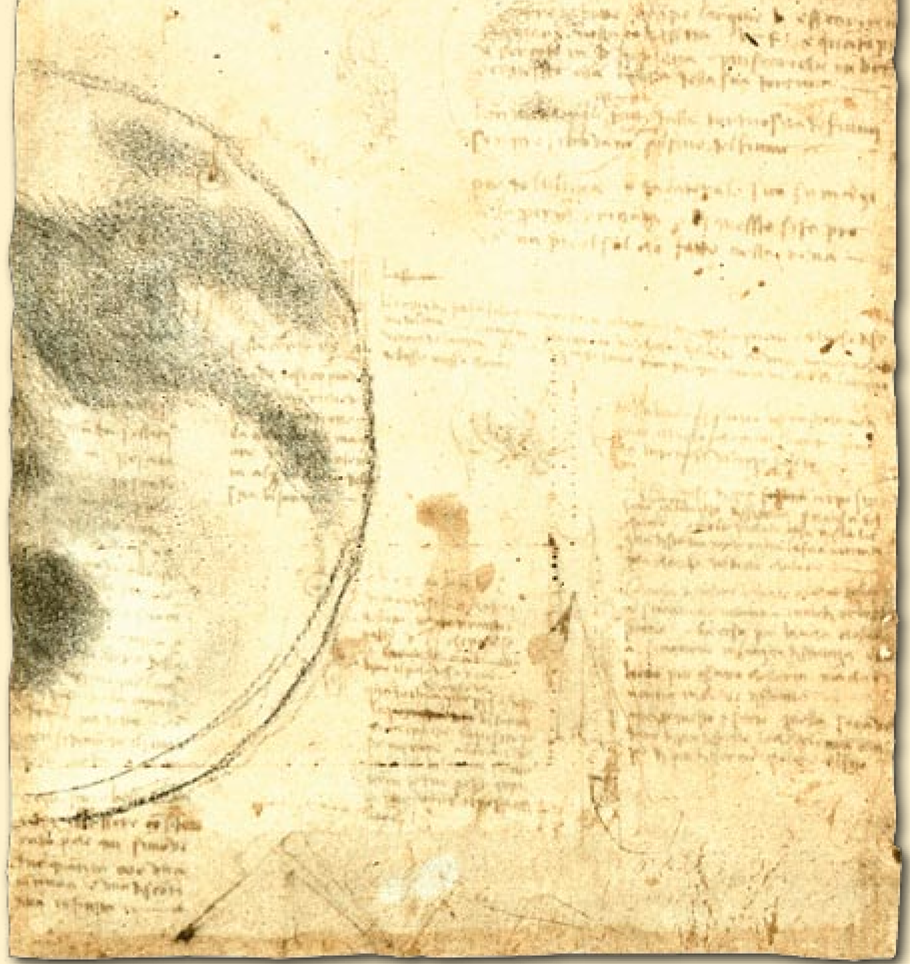
ANALYZING A BIOTERROR ATTACK ON THE FOOD SUPPLY: THE CASE OF BOTULINUM TOXIN IN MILK. Lawrence M. Wein y Yifan Liu en *PNAS*, vol. 102, n.º 28, págs. 9984-9989; 12 de julio de 2005.

ENCYCLOPEDIA OF BIOTERRORISM DEFENSE. Dirigido por Richard F. Pilch y Raymond A. Zilinskas. Wiley, 2005.

SERIOUS ISSUES RELATING TO THE CLINICAL USE OF UNLICENSED BOTULINUM TOXIN PRODUCTS. Andy Pickett y Martin Mewies en *Journal of the American Academy of Dermatology*, vol. 61, n.º 1, págs. 149-150; julio 2009.



1. LEONARDO DA VINCI (1452-1519) intentó registrar a simple vista algunas formaciones lunares. A la derecha, un esquema encontrado entre sus notas.



Orígenes y desarrollo de la cartografía lunar

Desde las primeras observaciones telescópicas hasta el siglo XIX

Manfred Gottwald





2. EL FISICO INGLES WILLIAM GILBERT (1540-1603) confeccionó el mejor mapa lunar de la época anterior al telescopio (*derecha*).

La Luna es el único cuerpo celeste sobre cuya superficie nos es dado percibir detalles sin ayuda instrumental. Como muestran los numerosos mitos que se refieren a imágenes o rostros identificables sobre su superficie, nuestro satélite viene siendo observado con detalle desde antiguo. Un ejemplo lo constituyen algunas de las obras de Jan van Eyck (principios del siglo XV), donde la Luna aparece retratada con gran finura. Sin embargo, las primeras representaciones de nuestro satélite según los criterios científicos actuales no aparecerían hasta el Renacimiento. Las primeras ilustraciones de este tipo se atribuyen a Leonardo da Vinci (1452-1519), entre las que destaca la media luna del *Codex Atlanticus*, datada en 1513/14 (*véase la figura 1*).

Hacia el año 1600, el físico inglés William Gilbert (1540-1603) se dispuso a retratar la luna llena. Su dibujo, que tardaría cincuenta años en ver la luz en *De mundo nostro sublunari*, distingue regiones claras y oscuras e introduce, por primera vez, trece nombres para accidentes lunares (*véase la figura 2*). Estas aportaciones hacen de Da Vinci y Gilbert los padres de la selenografía pretelescópica.

La cartografía lunar presenta sus propias particularidades. En primer lugar, sabemos que la Luna siempre nos muestra la misma cara. Sin embargo, las variaciones de su velocidad en su órbita alrededor de la Tierra, así como la inclinación de su eje con respecto al ecuador, originan un pequeño movimiento de libración (oscilación) a lo largo de su longitud y de su latitud. Así, con el transcurso del tiempo, resulta posible observar hasta un 60 por ciento de la superficie lunar. Por este motivo, cuando la confección de un mapa lunar se prolonga en el tiempo, la libración hace variar la posición relativa aparente de los detalles de su superficie.

Por otra parte, cuando la posición del Sol es baja, las sombras proyectadas por su luz destacan con nitidez la topografía lunar (montañas, cráteres, grietas) en las proximidades de su terminador (la línea que separa la parte iluminada de la parte en sombra). Pero, al aumentar la altura del Sol, la imagen pierde plasticidad. En ese caso, lo que observamos con nitidez son las diferencias en la capacidad de reflexión de las distintas regiones.

Es por ello que la observación de la luna llena (cuando la luz solar incide perpendicularmente sobre el disco lunar) permite extraer pocas conclusiones sobre la topografía del satélite: sólo una imagen de la distribución espacial del albedo lunar (la cantidad de luz reflejada en cada área).

CONCEPTOS BASICOS

- La observación de la superficie lunar siempre ha fascinado al hombre. En el siglo XVII, con la invención del telescopio, dicho interés cristalizó en los primeros intentos por confeccionar mapas topográficos de la Luna. Parte de la toponimia introducida por los selenógrafos postreros del siglo XVII aún se mantiene a día de hoy.
- En un principio, el interés en detallar la superficie lunar se debió al intento de determinar las longitudes geográficas terrestres a partir del tránsito de la sombra durante los eclipses lunares.
- A pesar de las dificultades del proceso de observación, de la confección de mapas y de las planchas de impresión, en los siglos XVII y XIX vieron la luz mapas lunares completos de excelente calidad y con gran profusión de detalles.

La representación de la topografía de la totalidad de la superficie lunar reviste, por tanto, dificultad. A este problema hubieron de enfrentarse los primeros selenógrafos.

Hasta la invención de la fotografía y su empleo en astronomía, los mapas lunares se basaron exclusivamente en dibujos. En la larga cadena que va desde el original confeccionado con ayuda del telescopio hasta las cartas lunares impresas habían de superarse numerosas dificultades. Durante los primeros años de la selenografía, en el siglo XVII, los dibujos debían realizarse con telescopios de pequeña apertura, seguimiento defectuoso o dimensiones poco manejables. Para reducir los defectos de las imágenes eran necesarios refractores con una gran distancia focal; sólo más tarde sería accesible el objetivo acromático. Por lo demás, eran las habilidades artísticas del observador las que determinaban la calidad del original. El paso siguiente consistía en elaborar, a partir del dibujo, las planchas de impresión, algo que sólo podía ser llevado a cabo por especialistas.

Cualquier cartografía tiene como objetivo representar una región del modo más fiel posible e identificar sus detalles. Para ello se necesita, además de una imagen, una nomenclatura libre de ambigüedades. Los primeros selenógrafos introdujeron con frecuencia nombres arbitrarios. Con el transcurso del tiempo se fueron estableciendo nombres estándar cuyo uso se ha conservado. Sin embargo, aún en el siglo XX la cuestión de una nomenclatura única seguía a la orden del día. Así lo pusieron de manifiesto las primeras sondas espaciales que proporcionaron imágenes de la cara oculta de la Luna, lo que obligó a dar nombre a los accidentes recién descubiertos.



3. GALILEO GALILEI (1564-1642) fue el primero en dibujar la Luna con ayuda de un telescopio.



4. DOS FASES LUNARES de la primera edición del *Sidereus nuncius* de Galileo, aparecida en marzo de 1610. A la derecha, dos dibujos florentinos bajo condiciones de iluminación similares.

Siglo XVII: los fundamentos de la cartografía lunar

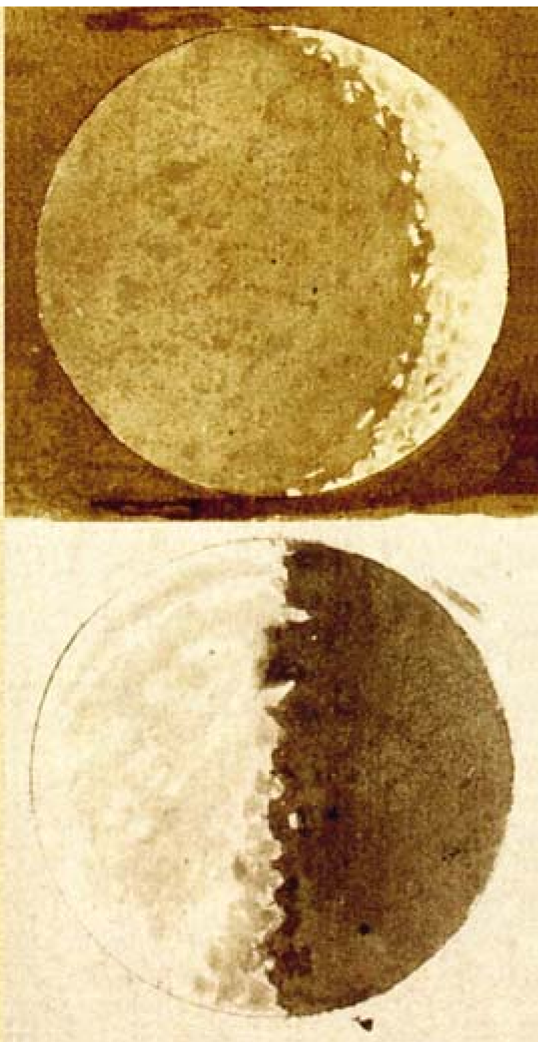
Las primeras observaciones telescópicas de la Luna fueron publicadas en marzo de 1610 por Galileo Galilei (1564-1642) en su *Sidereus nuncius*. Allí se describe la Luna como un mundo de superficie irregular semejante a la terrestre. En la primera edición, aparecida en Venecia, se representan sólo algunas fases lunares (*véase la figura 4*). El enorme cráter que aparece justo en el terminador de la media luna se interpreta como una representación exagerada del cráter Albategnius. Un ejemplar del *Sidereus nuncius* aparecido en fecha reciente reproduce las fases según los dibujos originales de Galileo, considerados como los modelos para las planchas de cobre. Existen otros bocetos de la Luna, entre ellos los dibujos a tinta en los que Galileo corrigió la representación de los cráteres gigantes.

Copias posteriores del *Sidereus nuncius* muestran las representaciones de la Luna con una calidad muy reducida. A ello contribuyeron tallas de madera mal terminadas y fases lunares mal orientadas. Galileo no empleó en ninguno de sus dibujos una nomenclatura para las formaciones lunares. Por esta razón, los dibujos de Galileo no pueden considerarse mapas en sentido estricto, sino más bien un simple reflejo de sus observaciones telescópicas. El telescopio construido por él mismo poseía un objetivo de 37 milímetros de diámetro diafragmado hasta unos 15 milímetros. Captaba un campo celeste de 15 minutos de arco y contaba con 21 aumentos.

En agosto de 1609, unos meses antes de que Galileo dirigiera su telescopio hacia la Luna, el matemático inglés Thomas Harriot (1560-1621) había observado el satélite con un telescopio de seis aumentos. Los dibujos resultantes constituían una representación muy burda de las fases lunares que no podían compararse con los resultados de Galileo. Más tarde confeccionó otros dibujos, entre ellos una representación de la luna llena. Por desgracia, Harriot no fue muy prolífico en cuanto al número de publicaciones. Sus dibujos no aparecen en ningún libro, sólo en sus manuscritos.

Durante las décadas siguientes, el uso del telescopio se extendió en Europa. Numerosos observadores, algunos tan conocidos como Robert Hooke (1635-1703) o Christian Huygens (1629-1695), se dedicaron a la investigación de nuestro satélite. No obstante, gran parte de sus resultados exhibieron una calidad modesta o bien despertaron poco interés. La figura 6 reproduce los *Mapas de la*

SIDEREUS NUNCIUS/BIBLIOTECA NACIONAL CENTRAL DE FLORENCIA (*fases lunares*)/*Sterne und Weltraum*

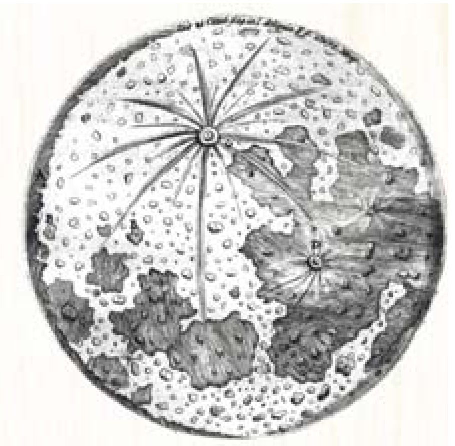




5. EL JESUITA Y ASTRONOMO Christoph Scheiner (1573-1650), originario de Ingolstadt.

6. REPRESENTACIONES DE LA LUNA de Cristoph Scheiner (*izquierda*, 1614) y Francesco Fontana (*derecha*, 1629).





Luna del jesuita y astrónomo Christoph Scheiner (1573-1650), natural de Ingolstadt, y del napolitano Francesco Fontana (1602-1656), jurista y constructor de telescopios.

Mayor consideración merecen las imágenes impresas de Gassendi, Peiresc y Mellan. Pierre Gassendi (1591-1655), matemático en París, se ocupó de la determinación de la longitud geográfica de puntos terrestres a partir de la observación del tránsito de la sombra durante los eclipses lunares. En colaboración con Nicolas de Peiresc (1580-1637), descubridor de la nebulosa de Orión, elaboró las ilustraciones detalladas de la luna llena que necesitaba para ello. Además, confeccionaron dibujos de las restantes fases lunares. Con el objetivo de reproducir los originales con la mayor fidelidad posible, solicitaron la ayuda de Claude Mellan, reputado maestro grabador de cobre. El resultado de su obra data de 1637 y exhibe una excelente calidad para la época (*véase la figura 9*). Lamentablemente, sus



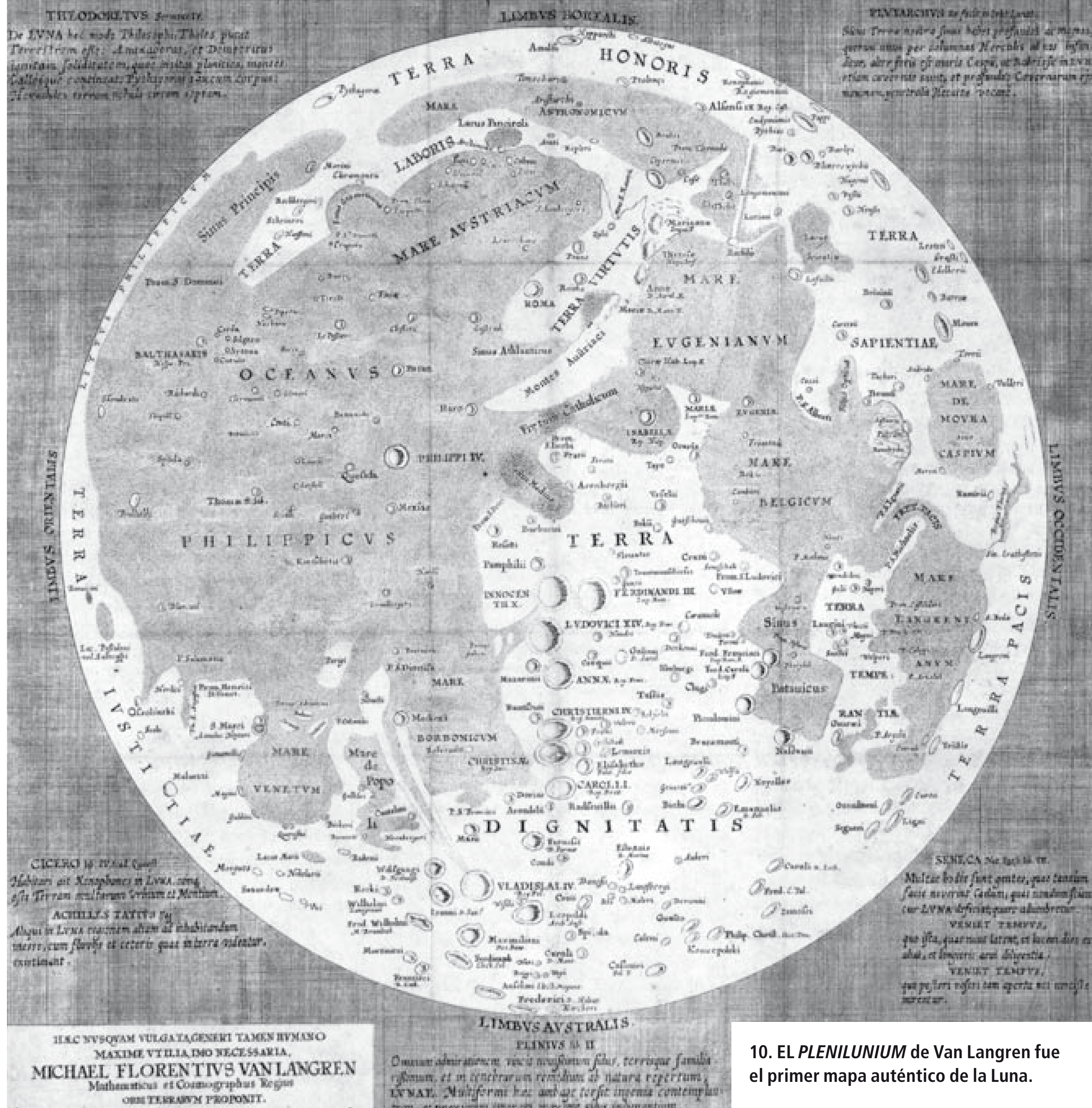
7. PIERRE GASSENDI (1591-1655).



8. NICOLAS DE PEIRESC (1580-1637).



9. CUARTO MENGUANTE según las observaciones de Gassendi y Peiresc, retratado por Claude Mellan.



10. EL *PLENILUNIUM* de Van Langren fue el primer mapa auténtico de la Luna.

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE LEIDEN/*Sterne und Weltraum*

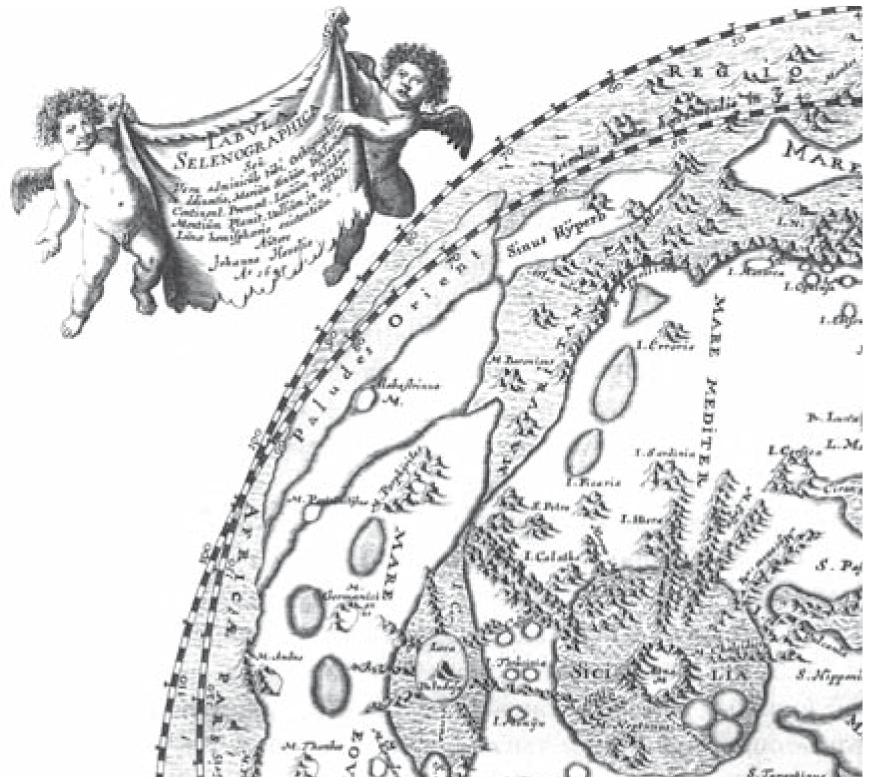
trabajos se vieron interrumpidos por la muerte de Peiresc ese mismo año, lo que también impidió la introducción de una primera nomenclatura lunar. En los documentos de Gassendi pueden hallarse propuestas para la designación de más de diez formaciones lunares, que ya incluyen expresiones como *mare* ("mar"), *mons* ("monte") o *rupes* ("desfiladero").

El honor de haber realizado el primer mapa con medidas selenográficas rigurosas corresponde al flamenco Michiel Florent van Langren (1600-1675), quien procedía de una reconocida familia de cartógrafos y trabajaba al servicio de la casa real española. El propósito original de Van Langren (motivado por el problema de la determinación de longitudes geográficas) consistía en publicar un mapa completo de la Luna junto con otros dibujos y sus correspondientes descripciones. Sin embargo, sólo logró llevar a cabo la primera parte de su proyecto. A lo largo de varios años, realizó dibujos de la Luna en sus diferentes fases y dedujo de ellos el mapa completo. Para designar las formaciones lunares empleó más de trescientos nombres, los cuales tomó de la nobleza europea, de científicos, filósofos, santos o príncipes de la Iglesia, completados con descripciones geográficas o incluso categorías morales.

De manera casi simultánea, el astrónomo Johannes Hevelius (1611-1687), miembro de una familia de cerveceros de Danzig, también se dedicó a la cartografía lunar. Dado que Van Langren era conocedor del trabajo de Hevelius, se esforzó en publicar su obra con la mayor rapidez posible. En 1645 publicó un gran mapa lunar de 34 centímetros (*Carta de la luna llena* o *Plenilunium*), que reproduce con bastante fidelidad la topografía y la distribución de la luminosidad de la superficie lunar (*véase la figura 10*). A juzgar por el número de ejemplares conservados a día de hoy, su edición debió ser muy limitada, lo que probablemente impidió que la nomenclatura de Van Langren se impusiese en épocas posteriores. Por primera vez, su

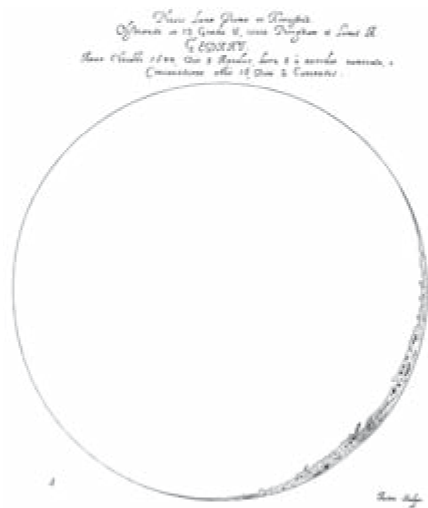


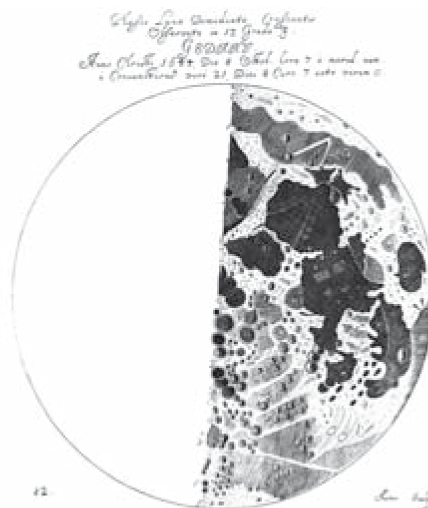
11. JOHANNES HEVELIUS (1611-1687), astrónomo originario de Danzig.

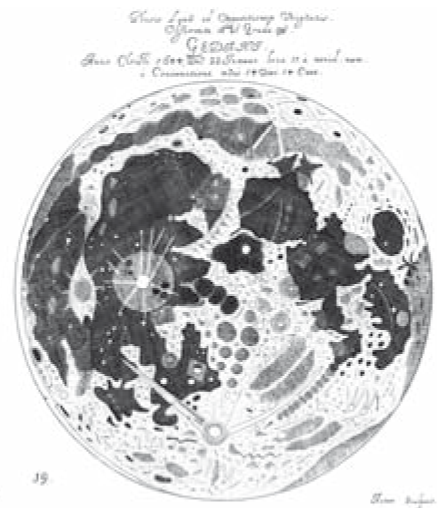


13. DETALLE DEL MAPA DE HEVELIUS. La formación designada como *Aetna Mons* corresponde al cráter de Copérnico. Cabe destacar el sistema de rayos luminosos que parten de él, representados a modo de cadenas de montañas.

12. TRES FASES LUNARES de la *Selenographia* de Hevelius, correspondientes a abril, octubre y enero de 1644 (*de izquierda a derecha*).







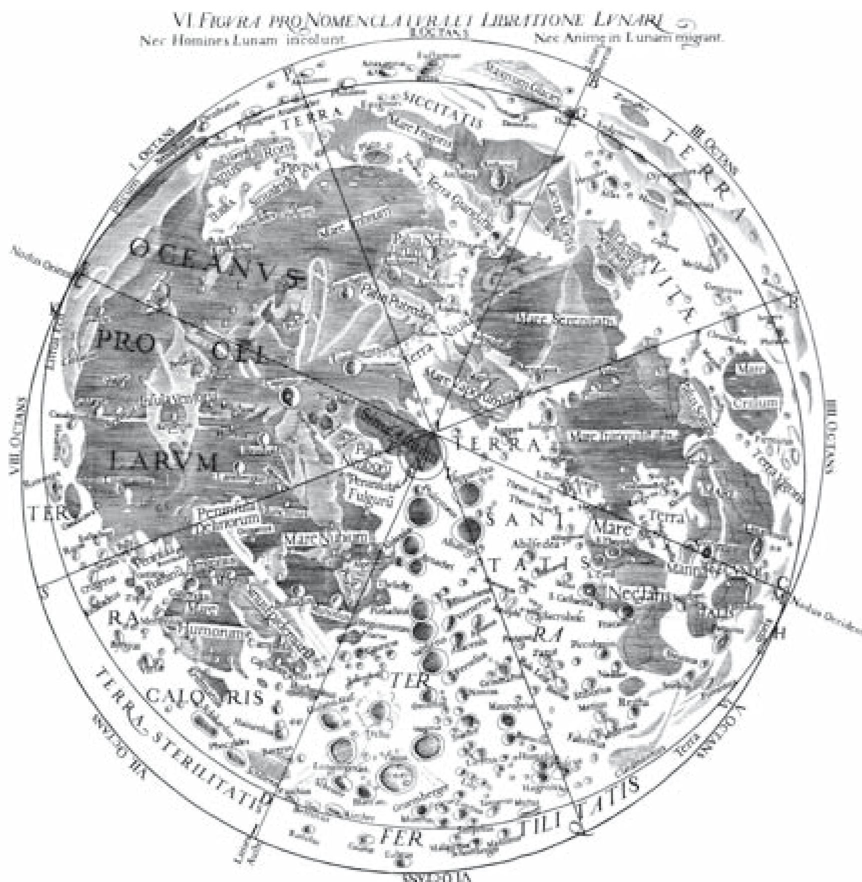
Plenilunium empleaba de forma explícita descripciones como “mares” o “montes”, pero, con muy pocas excepciones, ninguno de sus nombres ha sobrevivido hasta nuestros días.

Por su parte, Hevelius, provisto de generosos medios financieros, disfrutó de un observatorio astronómico que le permitió recolectar en poco tiempo el material necesario para confeccionar un mapa de la Luna. En 1647 vería la luz su obra principal, *Selenographia*, un extenso trabajo de más de 600 páginas. Incluía tres ilustraciones de la luna llena: una con su topografía, otra del albedo lunar y una tercera con numerosos detalles y sus nombres. Esta última era especialmente peculiar, ya que representaba los cráteres, montañas e incluso los reflejos luminosos en forma de cadenas montañosas, al estilo de los mapas geográficos de la época (*véase la figura 13*). La nomenclatura empleada por Hevelius difiere de la de Van Langren (no se sabe si Hevelius conocía el *Plenilunium*) en que aquél se decidió por el uso de nombres geográficos. Además de sus dibujos de la luna llena, otros muestran al satélite en sus diferentes fases (*véase la figura 12*). En cualquier caso, aunque la *Selenographia* gozó de gran difusión y reconocimiento, su nomenclatura tampoco perduró.

El establecimiento de una toponimia lunar llegó con la obra que ha pasado a la historia de la selenografía con el nom-



14. FRANCESCO MARIA GRIMALDI (1618-1663).



15. LA CARTA LUNAR DE GRIMALDI con la nomenclatura de Giovanni Battista Riccioli.

bre de “Mapas de Grimaldi-Riccioli”. El óptico Francesco Maria Grimaldi (1618-1663, descubridor de la difracción de la luz) elaboró, a partir de los trabajos de Van Langren, Hevelius y otros, lo que a su juicio constituía un mapa mejorado de la Luna. Su colaborador, el jesuita Giovanni Battista Riccioli (1598-1671), incluyó dicha representación en su obra *Almagestum novum*, publicada en 1651, e introdujo una nueva nomenclatura (*véase la figura 15*). En un principio, la misma era similar a la de Van Langren, si bien Riccioli se limitó en gran medida a emplear nombres de personas relacionadas con la astronomía. A ello añadió denominaciones tomadas de la meteorología para regiones con un bajo albedo, como *Mare Imbrium* (“Mar de la Lluvia”) u *Oceanus Procellarum* (“Océano de las Tormentas”). La terminología introducida por Riccioli fue la que finalmente se impuso, aunque sería completada o corregida durante los siglos siguientes.

Van Langren, Grimaldi-Riccioli y, sobre todo, Hevelius habían colocado muy alto el listón de la selenografía. Tras ellos, el siglo XVII ya no vería aparecer representaciones lunares de mejor calidad. Son sin embargo dignas de mención las observaciones de Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) y sus colaboradores. De ellas surgió, en 1679, una detallada representación de 54 centímetros y con elevadas pretensiones estéticas (*véase la figura 17*). Lamentablemente, sus autores publicaron muy pocos ejemplares, por lo que el trabajo nunca gozó de excesiva difusión. Aun así, supuso la base de numerosas pequeñas copias, sobre todo en Francia. Dicho mapa se dio a conocer con el nombre de “La mujer en la Luna”, ya que el promontorio Heráclides, en el borde del *Sinus Iridium* (“Golfo de Iris”), quedaba representado como una diminuta figura femenina. Se sospecha que se trataba de un retrato de la mujer de Cassini.

Siglo XVIII: un lento desarrollo

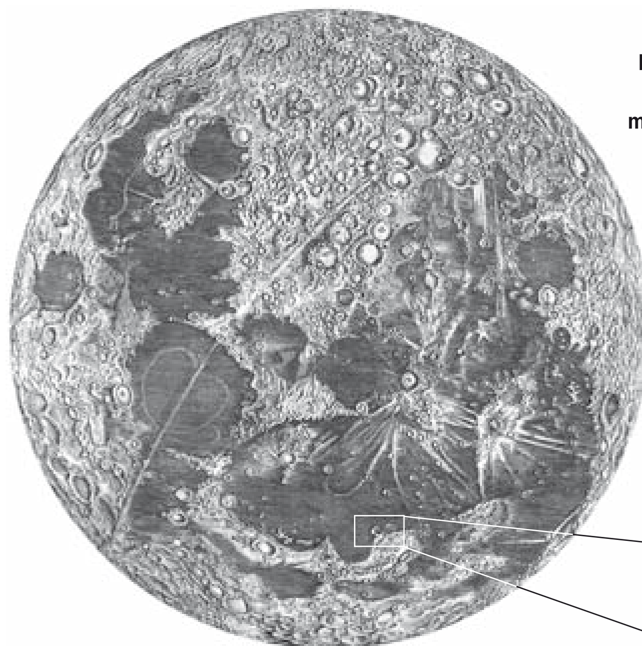
Aunque las prestaciones de los telescopios aumentaban, a principios del siglo XVIII nadie pareció demostrar demasiado interés por mejorar los mapas existentes desde hacía ya más de cincuenta años. No sería sino hasta mediados de siglo cuando Tobias Mayer (1723-1762), natural de Marbach, se ocupó del asunto. Mayer había adquirido profundos conocimientos astronómicos de manera autodidacta. Sentía un interés particular hacia la Luna, ya que su objetivo era resolver el problema de la determinación de las longitudes geográficas en el mar a partir de las efemérides de la Luna (como alternativa al desarrollo de cronómetros marinos de precisión). Reconoció la necesidad de una mejora en las representaciones existentes del satélite, objetivo para el que se valió de sus conocimientos como cartógrafo.

Hasta entonces, los mapas lunares se habían confeccionado a partir de los dibujos de las impresiones visuales del observador con ayuda del telescopio. Sin embargo, Mayer utilizó un micrómetro para determinar unívocamente la posición de los accidentes de la Luna. De esta suerte obtuvo la posición de 23 puntos sobre la superficie lunar, que utilizó en 1749 para unos 40 dibujos muy precisos. Estos supusieron la materia prima para los primeros dos mapas de la totalidad de la Luna basados en mediciones. Aunque ya en 1750 Mayer hacía referencia a sus observaciones en su *Informe sobre la bola de la Luna*, sus mapas no verían la luz hasta después de su muerte. El menor de ellos fue publicado por primera vez en 1775 por mano de Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799) en su obra *Tobias Mayer opera inedita, vol. I* (*véase la figura 19*). Con ayuda del mapa, Lichtenberg midió otras posiciones y las dotó de un sistema de coordenadas.

Sin embargo, los restantes dibujos de Mayer y el mayor de sus mapas no serían



16. **GIOVANNI DOMENICO CASSINI (1625-1712).**



17. MAPA LUNAR DE CASSINI, de finales del siglo XVII. El promontorio de Heráclides quedaba representado como un rostro femenino.

accesibles al público hasta 130 años después. Fueron publicados en 1881 por W. Klinkerfues, director del Observatorio de Gotinga. A esas alturas, la calidad científica del material ya había sido superada por otros autores, pero la obra documentaba las sobresalientes habilidades de Mayer para la observación.

El segundo hito de la selenografía del siglo XVIII tendría lugar en Lilienthal, en las proximidades de Bremen. Johann Hieronymus Schröter (1745-1816), funcionario de la administración local y astrónomo aficionado, se dedicó a estudiar diferentes aspectos de la Luna, como los accidentes de su superficie, la posible existencia de una atmósfera o la altura de las montañas lunares. Schröter erigió en su residencia un observatorio astronómico al que, con el transcurso del tiempo, equipó con numerosos telescopios. Uno de ellos contaba con un espejo de 51 centímetros de diámetro y una distancia focal de más de ocho metros, lo que lo convertía en el mayor telescopio de Europa. El astrónomo Wilhelm Herschel proporcionó los espejos para algunos de los telescopios de Schröter.

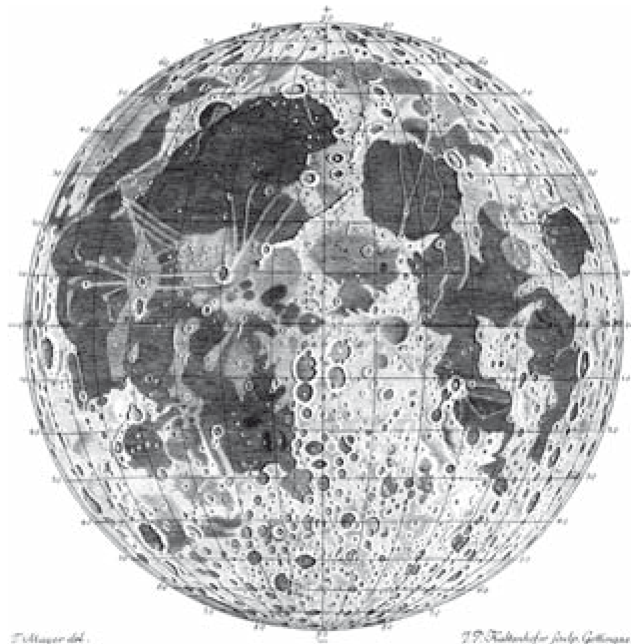
Hasta 1790, Schröter recopiló abundante material que, en 1791, le llevó a publicar la obra *Fragmentos selenográficos para un conocimiento más exacto de la superficie de la Luna, sus variaciones y atmósfera, junto con dibujos y mapas especiales.* Entre otras aportaciones, los *Fragmentos* contenían un gran número de bosquejos detallados, además del mapa de Tobias Mayer, elaborado y con la nomenclatura de Riccioli y Hevelius. La obra sería reeditada en 1802.

Existen opiniones diversas sobre la calidad de la obra de Schröter. Observador meticuloso, sus dibujos exhiben pequeños detalles que van de lo "sencillo" a lo "complejo" (*véase la figura 21*). Su inclinación a hipótesis rápidas tampoco halló la aprobación general. Dado que numerosos detalles carecían de nom-





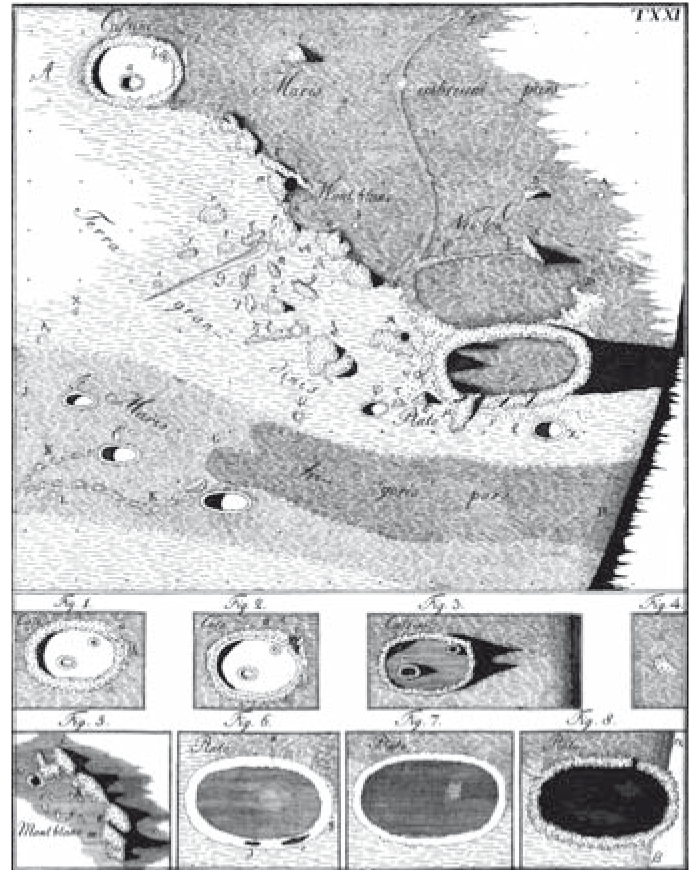
18. TOBIAS MAYER (1723-1762, *izquierda*) y Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799, *derecha*).



19. MAPA DE LA LUNA de Tobias Mayer, publicado por Lichtenberg en 1775.



20. JOHANN HIERONYMUS SCHRÖTER (1745-1816).



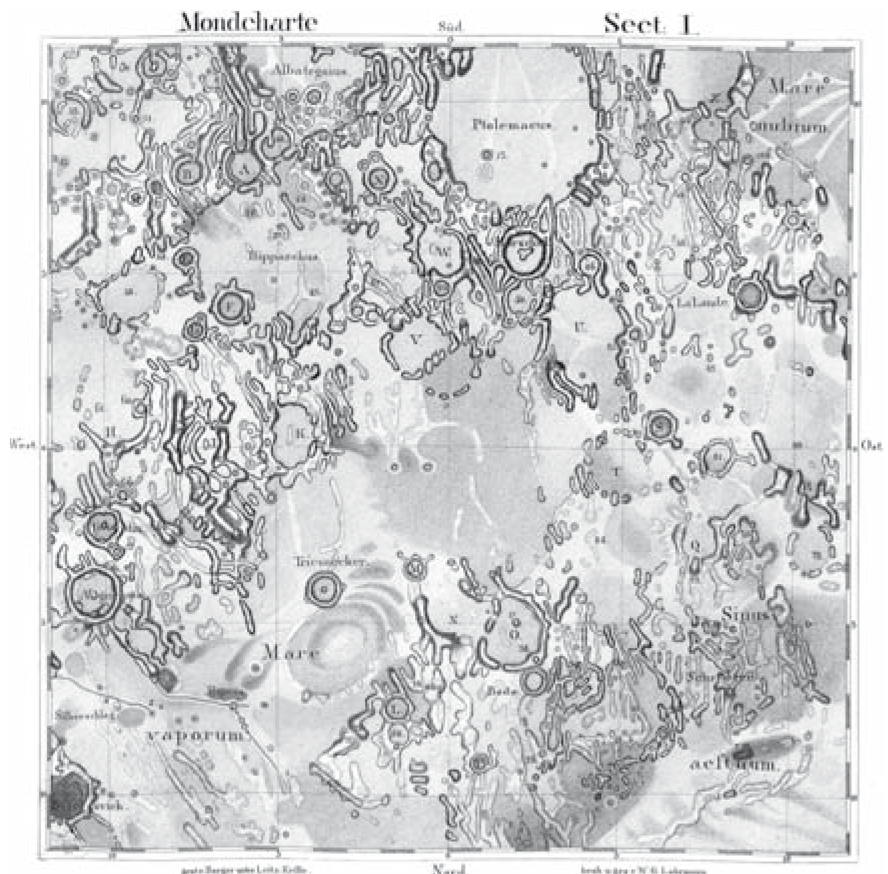
21. EL CRATER DE PLATON según los *Fragmentos* de Hieronymus Schröter.

bre, Schröter completó la nomenclatura de Riccioli. Introdujo denominaciones que hoy día son habituales en la lengua alemana, como *Rille* ("estría", para las rimas lunares), *Wallebene* ("planicie amurallada", para los cráteres) o *Ringgebirge* ("anillo montañoso", para los cráteres de gran tamaño). Con el paso del tiempo, el lenguaje popular adoptaría muchas de las expresiones recogidas en sus *Fragmentos*.

Aparte de Mayer y Schröter, el siglo XVIII apenas conocería a otros cartógrafos lunares de relevancia. A falta de un auténtico desarrollo, los textos astronómicos de aquel tiempo recurrieron con frecuencia a copias de los trabajos del siglo XVII.

Siglo XIX: culmen de las observaciones visuales

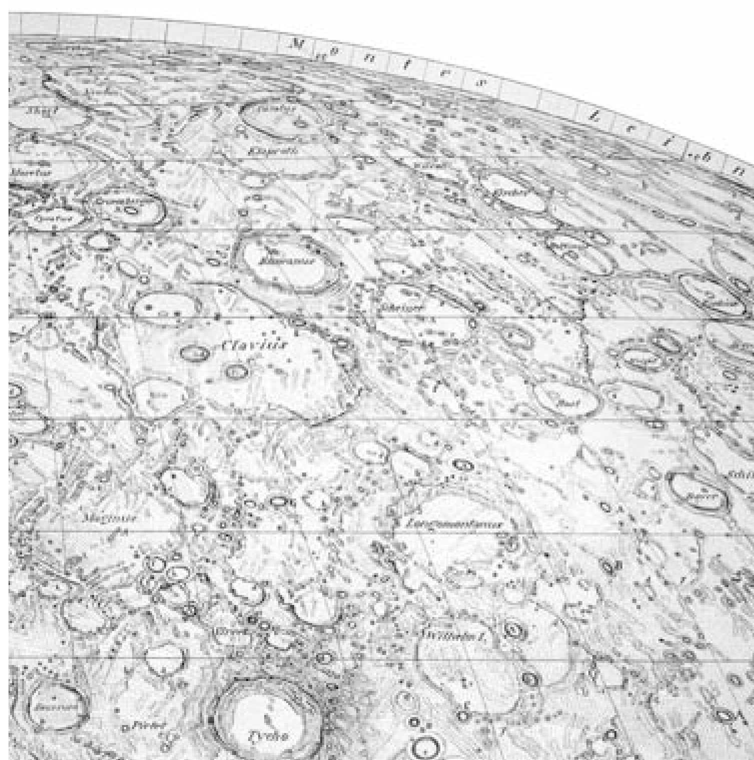
En contraposición al lento progreso de los siglos anteriores, a partir de 1800 la selenografía alcanzó con prontitud algunos de sus resultados más espectaculares. Gracias al desarrollo de cronómetros marinos, la Luna dejo de servir como instrumento para determinar longitudes geográficas. Ello la convirtió en objeto exclusivo de la astronomía. Al tiempo, un notable desarrollo instrumental había dado lugar a instrumentos ópticos de gran calidad, como el objetivo acromático (hacia 1750) o telescopios reflectores cada vez más potentes.



22. LA SECCION IV de los mapas lunares de Lohrmann, de 1824.



23. WILHELM BEER (1797-1850, *izquierda*), en una litografía de Carl Funke, y Johann Heinrich Mädler (1794-1874, *derecha*).



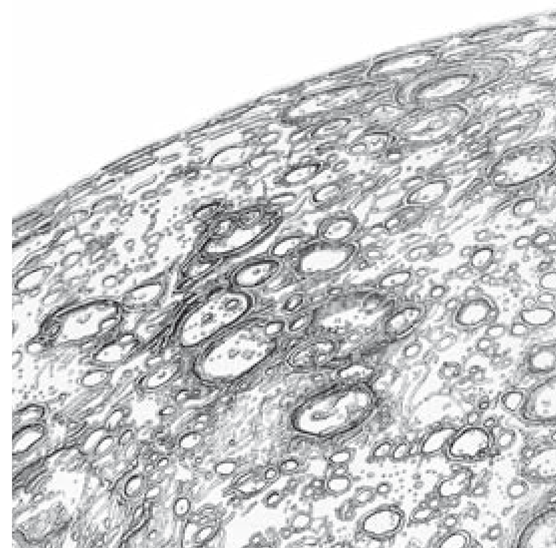
24. FRAGMENTO del *Mappa Selenographica* de Beer y Mädler, con los cráteres Tycho y Clavio.

En los primeros años del siglo, el pintor y astrónomo aficionado inglés John Russell (1745-1806) publicó sus observaciones de la Luna en dos representaciones artísticas muy refinadas. Sin embargo, la carencia de referencias cartográficas impidió que su obra se convirtiese en una contribución real a la selenografía. Tal objetivo lo alcanzaría poco después el geodesta sajón Wilhelm Lohrmann (1796-1840). Desde su lugar de observación, el cuarto piso de su casa de Pirna, en las inmediaciones de Dresde, midió, con ayuda de un micrómetro filiforme y dos refractores de montaje paraláctico con objetivos de 14 y 9,5 centímetros de diámetro, las posiciones de distintas formaciones lunares. A partir de estas medidas, Lohrmann deseaba confeccionar un gran mapa de 95 centímetros del satélite terrestre. Con este fin dividió la superficie lunar en 25 cuadrados de igual tamaño a los que denominó "secciones". Cada sección quedó representada en un mapa individual. Ya en 1824 aparecieron las cuatro primeras secciones en su *Topografía de la superficie lunar visible*. Junto a cada mapa (*véase la figura 22*) aparecía una descripción del aparato de medida y del método empleado. En los años siguientes, Lohrmann logró completar las medidas y dibujos de las secciones restantes, pero su fallecimiento en 1840 a causa del tifus le impidió verlas publicadas.

En los mapas de Lohrmann destaca la técnica, nueva en aquella época, del sombreado a líneas para representar la topografía lunar, con la que las variaciones de altura se simbolizaban mediante conjuntos de trazos paralelos. Debido a la exactitud de las medidas y a su cuidadosa técnica de representación, los cuatro mapas de Lohrmann constituyen un notable progreso frente a trabajos anteriores. El resto de sus dibujos también hallaron difusión pública. El selenógrafo J. F. Julius Schmidt, de quien hablaremos más adelante, publicó en 1878 las obras completas de Lohrmann con el título *Cartas de la Luna en 25 secciones y 2 tablas explicativas*. Esta publicación llegó después de que Schmidt editase, durante más de 25 años, los dibujos de Lohrmann junto con sus propios trabajos.

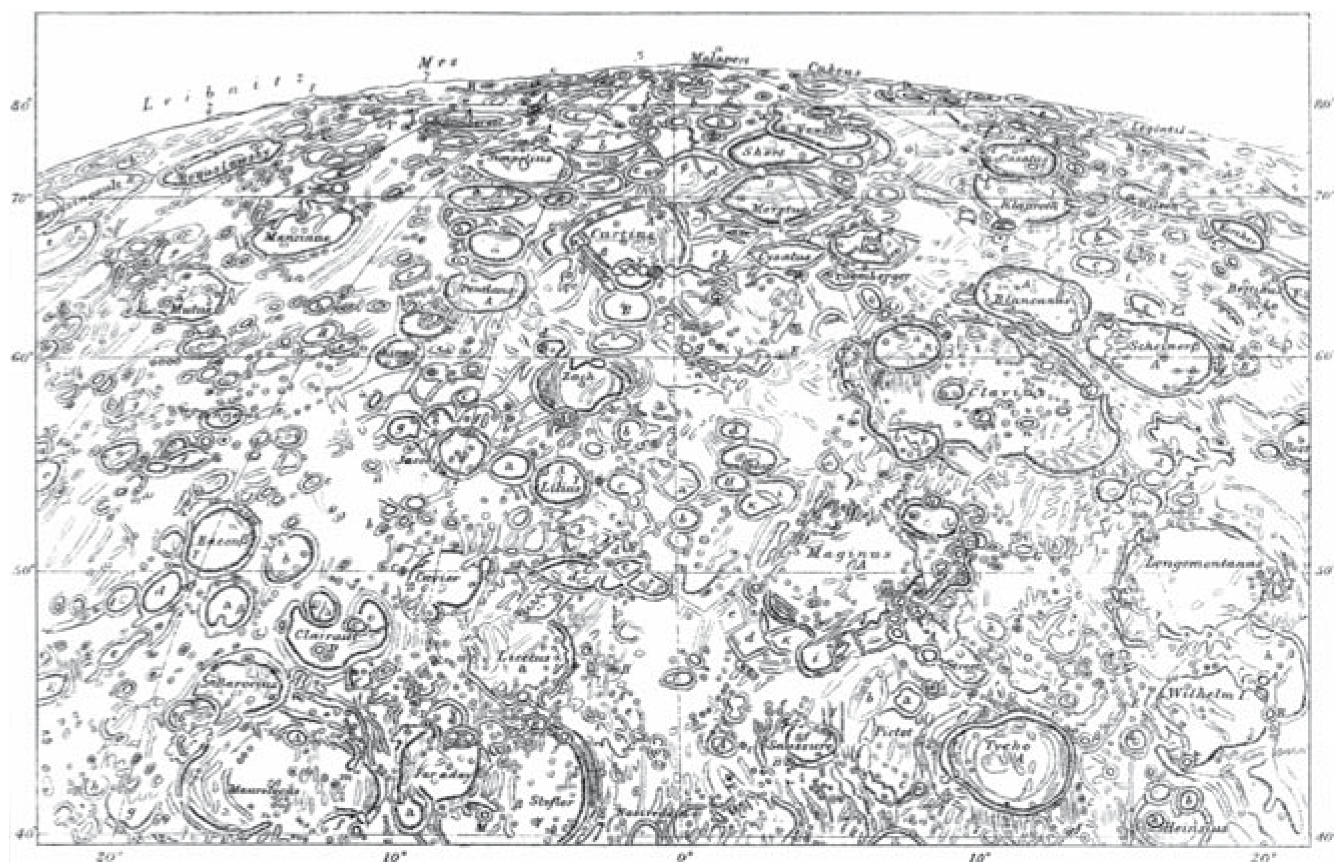
Los grandes progresos de Van Langren fueron superados en el siglo XVII rápidamente por la *Selenographia* de Hevelius. Lo mismo ocurrió con los mapas de Lohrmann. Sus representaciones habían supuesto un gran salto, pero se hallaban incompletas. Entretanto, en Berlín, los amigos Wilhelm Beer (1797-1850, banquero y astrónomo aficionado) y Johann Heinrich Mädler (1794-1874, en esa época todavía maestro de escuela) se entregaron a la tarea de producir una obra lunar completa que debía contener un mapa de 95 centímetros de diámetro.

Para sus observaciones emplearon el observatorio privado de Beer, equipado con un refractor de Fraunhofer de 9,5 centímetros. Entre los años 1834 y 1836 publicaron la primera parte, *Mappa Selenographica*, la cual constaba de cuatro cuadrantes lunares (*véase la figura 24*). La impresión no se efectuó con las usuales planchas de cobre, sino con técnicas de litografía. A pesar de la calidad de los trabajos de Lohrmann, la carta de Beer y Mädler los superó. Ello se debió también a sus particularidades gráficas, como un cuidado arte de sombreado o la elección de los tipos caligráficos.



25. BORDE LUNAR en las inmediaciones del polo sur alrededor del cráter Hommel (fragmento de la hoja XXIV de la *Carta de las montañas lunares* de Schmidt).

Poco después, en 1837, apareció *La Luna según sus relaciones cósmicas e in-*



26. LA REGION del polo sur lunar según Neison.

El autor

Manfred Gottwald se doctoró en astronomía de rayos gamma en el Instituto Max Planck de Física Extraterrestre (MPE). Ha colaborado en las misiones espaciales de la ESA y del MPE. Actualmente trabaja en el Instituto de Métodos de Teledetección de la Agencia Espacial Alemana, donde está a cargo del instrumento de estudios atmosféricos SCIAMACHY.

Bibliografía complementaria

MAPPING OF THE MOON – PAST AND PRESENT. Z. Kopal y R. W. Carder en *Astrophysics and Space Science Library*, vol. 50D. Reidel Publishing, 1974.

MAPPING AND NAMING THE MOON. E. A. Whitaker, Cambridge University Press, 1999.

EPIC MOON. B. Sheehan y T. Dobbins, Willmann-Bell, 2001.

dividuales, o selenografía comparativa general, obra en la que Beer y Mädler desarrollaban sus ideas sobre la Luna, a la que describían como un lugar sin vida, sin atmósfera y sin agua. Esta obra y el *Mappa Selenographica* se convirtieron, durante el resto del siglo XIX, en referencias estándar sobre la investigación lunar.

¿Cómo se superó el trabajo de Beer y Mädler? Para ello eran necesarias observaciones más exactas, realizadas en lo posible con telescopios de mayor apertura. Ello fue lo que se propuso J. F. Julius Schmidt (1825-1884). Nacido en Eutin, en la norteña región de Holstein, sus investigaciones astronómicas le condujeron hacia el Sur. En 1858 fue nombrado director del Observatorio Astronómico de Atenas.

Desde 1840, y durante más de 35 años, Schmidt se dedicó a la cartografía lunar. Junto a numerosas publicaciones, como *La Luna* (de 1856) o *Sobre las rimas lunares* (de 1866), reunió material para la construcción de un mapa que debía ser el doble de grande que el de Lohrmann o el de Beer y Mädler. Schmidt midió visualmente la posición de unas 150 formaciones, las cuales empleó como referencia en sus dibujos. Los mayores telescopios que utilizó fueron refractores de los observatorios de Berlín y Roma, con distancias focales de algo más de cuatro metros. En 1878 publicó la *Carta de las montañas lunares*. Constaba de 25 hojas cuadradas de 39 centímetros de lado (*véase la figura 25*) y de un tomo adicional con explicaciones. En sus mapas, cuatro veces mayores que los de Lohrmann o los de Beer y Mädler, aparecen más de 30.000 cráteres. Sin duda, el mapa de Schmidt constituye el punto álgido de la selenografía hasta el momento, si bien su autor, muy crítico consigo mismo, indicaba en ellos pequeños defectos.

Casi al mismo tiempo que Schmidt, el inglés Edmund Neison (1849-1940, cuyo verdadero nombre era Edmund Neville Nevill) se afanaba en una versión retocada de la obra de Beer y Mädler. Junto a un atlas que representaba la Luna en 22 mapas y que contenía observaciones del propio Neison, se publicó en 1876 con el título de *La Luna y la condición y configuración de su superficie*. Una ventaja de las cartas de Neison era su pequeño formato, que garantizó una amplia difusión de su atlas lunar (*véase la figura 26*). Aunque no alcanzaba la plenitud de detalles del *Mappa selenographica* ni, desde luego, la de la carta lunar de Schmidt, su atlas se convirtió en un estándar selenográfico. El libro de Neison se encuentra entre las numerosas descripciones del satélite terrestre que aparecieron a finales del siglo XIX. Algunas contenían mapas cuyo nivel gráfico aseguró su utilidad hasta bien entrado el siglo siguiente.

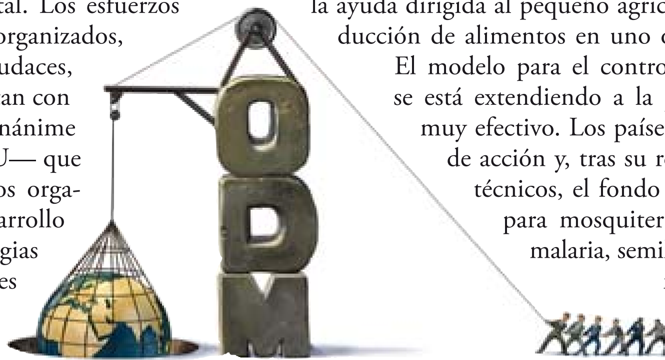
Los objetivos del desarrollo del milenio, un decenio después

Diez años de objetivos cumplidos demuestran que se puede erradicar la pobreza extrema

Jeffrey D. Sachs

Los ocho Objetivos del Desarrollo del Milenio (ODM) representan, en numerosos aspectos, la cenicienta del desarrollo internacional. Pero los ciento sesenta dirigentes mundiales reunidos en septiembre de 2000 en las Naciones Unidas tuvieron la inspiración suficiente para adoptar la Declaración del Milenio, que incluía objetivos audaces en la lucha contra la pobreza, el hambre y las enfermedades (www.un.org/spanish/millenniumgoals/). En general, estas declaraciones no pasan de ser una mera oportunidad para salir en la foto. Sin embargo, los ODM han dado unos resultados esperanzadores. La próxima cumbre de septiembre puede convertir los ODM, en su décimo aniversario, en el fulcro histórico que acabe con la pobreza extrema.

Dos secretarios generales de la ONU, Kofi Annan, quien propuso estos objetivos, y Ban Ki-moon, que encabeza hoy su defensa con determinación, se han asegurado de que los objetivos encarnen el compromiso internacional para erradicar la pobreza más extrema y letal. Los esfuerzos mundiales suelen ser débiles y desorganizados, pero los ODM son tan claros, audaces, prácticos e incontestables —y cuentan con la legitimidad de la aprobación unánime de los estados miembros de la ONU— que se han convertido en los principios organizativos de los programas de desarrollo de los países pobres, en las estrategias de asistencia de los países donantes y en las prácticas operativas de organizaciones no gubernamentales (ONG) de todo el mundo.



Cuando Kofi Annan me pidió en 2002 que dirigiera el Proyecto del Milenio de la ONU con el fin de identificar posibles métodos para alcanzar los ODM, descubrí que las comunidades de médicos y científicos del mundo, así como un gran número de empresas importantes, estaban preparados para realizar un enorme esfuerzo en la consecución de los ODM. También entendimos que, por medio de una red mundial de cientos de pensadores destacados, médicos y empresas, se podían impulsar los distintos objetivos (reducir el hambre, asegurar la escolarización, evitar la mortalidad infantil, detener las pandemias, luchar contra las desigualdades de género, etcétera) con inversiones y estrategias muy realistas.

El liderazgo de Ban Ki-moon en el control de la malaria, una parte del sexto ODM, ejemplifica ese punto. En 2008, Ban hizo un llamamiento a la ONU y sus estados miembros, y a la sociedad civil, para adoptar una estrategia conjunta en la lucha contra el paludismo. Como aspecto fundamental, se contemplaba la distribución gratuita de mosquiteras tratadas con insecticida de larga duración para reducir la transmisión de la malaria, además del tratamiento farmacológico *in situ* ante cualquier episodio de la enfermedad. Tras haber distribuido casi 200 millones de mosquiteras, la mortalidad a causa del paludismo ha caído en picado en toda Africa. El sector privado de fabricantes de mosquiteras ha desempeñado un papel crucial, al favorecer la cobertura y disponibilidad del producto a gran escala. El enviado especial para la malaria de Ban, Ray Chambers, informa que hacia finales de 2010 la cobertura de mosquiteras será total, tal como se planeó.

En septiembre pasado, el presidente Barack Obama prometió con audacia ante la ONU que llegaría a la cumbre del presente año con un plan global para hacer realidad los ODM. Y que pondría las miras en la erradicación de la pobreza extrema de nuestros días. En uno de los esfuerzos más significativos de este año, su administración ha emitido desde el Banco Mundial un nuevo fondo destinado a la agricultura. Se pretende estimular la producción del pequeño agricultor y contribuir así al primer ODM: la drástica reducción del hambre. Como han demostrado Malawi y otros países africanos, la ayuda dirigida al pequeño agricultor puede duplicar la producción de alimentos en uno o dos años.

El modelo para el control del paludismo, que ahora se está extendiendo a la pequeña agricultura, resulta muy efectivo. Los países preparan planes nacionales de acción y, tras su revisión y aprobación por los técnicos, el fondo global desembolsa el dinero para mosquiteras, medicamentos contra la malaria, semillas de alto rendimiento, abono y demás. Los desembolsos, al ser altamente dirigidos y mensurables, son de fácil seguimiento, con lo que se puede verificar su eficacia y evitar la corrupción. Ese enfoque puede aplicarse a una gran variedad de situaciones difíciles: la escolarización universal, el acceso al personal sanitario y a los sistemas de salud locales, la expansión de la electrificación rural por medio de energía solar y otras energías renovables, y la decisiva reducción de la mortandad femenina por parto. De esta forma, los objetivos definidos en los ODM se encuentran al alcance de la mano.

No cabe la menor duda de que los ODM han impulsado un avance notable, pero las dificultades siguen siendo enormes. El éxito requerirá de un plan que, en la cumbre de los ODM de septiembre, reúna a gobiernos, empresas, ONG y particulares para definir las estrategias nacionales. Lo que hace diez años pudo haberse quedado en una mera reunión para recibir el nuevo milenio, podría convertirse en el principio organizativo decisivo para acabar con la pobreza extrema en nuestros días.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

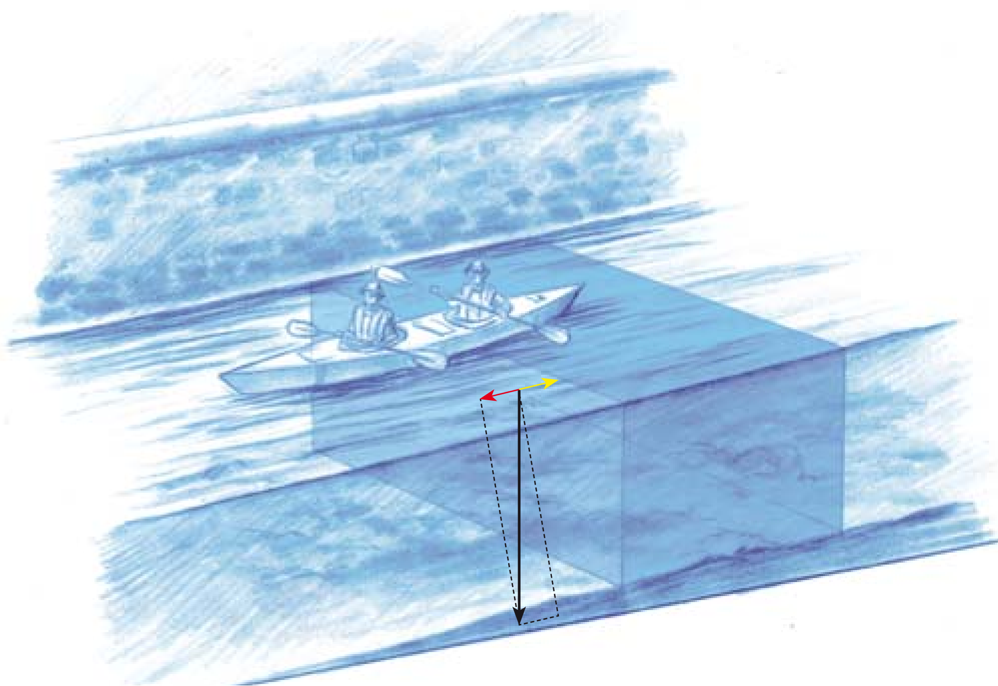
¿Río o torrente?

En función del caudal de un río, las irregularidades del lecho determinan la profundidad y la velocidad del agua

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Tormenta de verano. En pocas horas, el apacible río que serpentea en el fondo de la garganta se ha transformado en un torrente impetuoso. Un kayak que se ha aventurado en él se ve zarandeado en todas direcciones. Sus dos ocupantes, deportistas y curiosos, se preguntan mientras reman: ¿qué ha transformado el río en una corriente torrencial? ¿Se debe exclusivamente a un aumento del caudal? El fenómeno es más sutil de lo que parece y nuestros kayakistas deberán intentar no ahogarse en las leyes de la hidráulica.

En primer lugar, ¿por qué fluye un río? La respuesta es simple: debido a la acción de la gravedad. A lo largo de su curso, el lecho se halla inclinado y el agua se desliza sobre él. La fuerza motriz es la proyección del peso del agua a lo largo de la pendiente. Para un río como el Sena, la pendiente es muy pequeña: desciende 471 metros a lo largo de 775 kilómetros, lo que supone una pendiente (tangente del ángulo de inclinación) media de 0,0006. Ello implica que la fuerza motriz que actúa sobre una tonelada de agua es la de un peso de 600 gramos. A pesar de que toda fuerza provoca una aceleración, el agua mantiene una velocidad constante. Ello se debe a que la fuerza motriz queda contrarrestada por el rozamiento que ejercen las paredes del curso del río y, sobre todo, el fondo del lecho (al menos cuando el curso es mucho más ancho que profundo, como supondremos en lo que sigue). Para lechos reales, heterogéneos y rugosos, la corriente es turbulenta en sus proximidades, por lo que el rozamiento es proporcional al cuadrado de la velocidad media del agua.



1. Cada sección de agua fluye bajo la acción de su propio peso (*negro*) a causa de la inclinación del lecho. A la fuerza motriz de la gravedad (*rojo*) se opone la fuerza de rozamiento (*amarillo*), provocada por las irregularidades del fondo y de las paredes laterales del lecho. En régimen estacionario, esas dos fuerzas son iguales e implican que, cuando aumenta el caudal, crece también la velocidad y el calado del agua.

BRUNO VACARO

Caudal, velocidad y calado

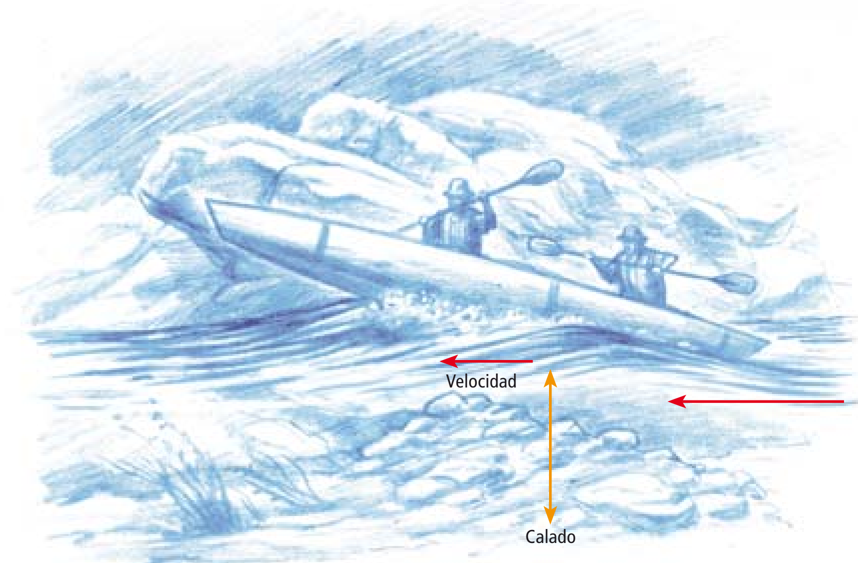
¿Cómo varía la velocidad del agua con la profundidad del lecho? Para saberlo, consideremos una sección de agua e impongamos que la fuerza motriz, proporcional al área de la sección (anchura × profundidad) y a la pendiente, sea igual a la fuerza de rozamiento (proporcional al cuadrado de la velocidad y a la anchura del lecho). Obtenemos así que la velocidad es proporcional a la raíz cuadrada del producto de la pendiente por el calado (la profundidad del agua). Esta fórmula, deducida en 1775 por el ingeniero Antoine Chézy, fue mejorada en 1923 para tener en cuenta el hecho de que la fuerza de rozamiento depende también de la profundidad. Como consecuencia, el exponente con el que la profundidad aparece en la expresión de la velocidad no es 1/2, sino 2/3.

Dado que el caudal se define como el producto de la velocidad por la sección, vemos que el calado aumenta como la potencia 3/5 del caudal y que la velocidad crece como la potencia 2/5. En otras palabras, cuando aumenta el caudal, aumentan el calado y la velocidad del agua.

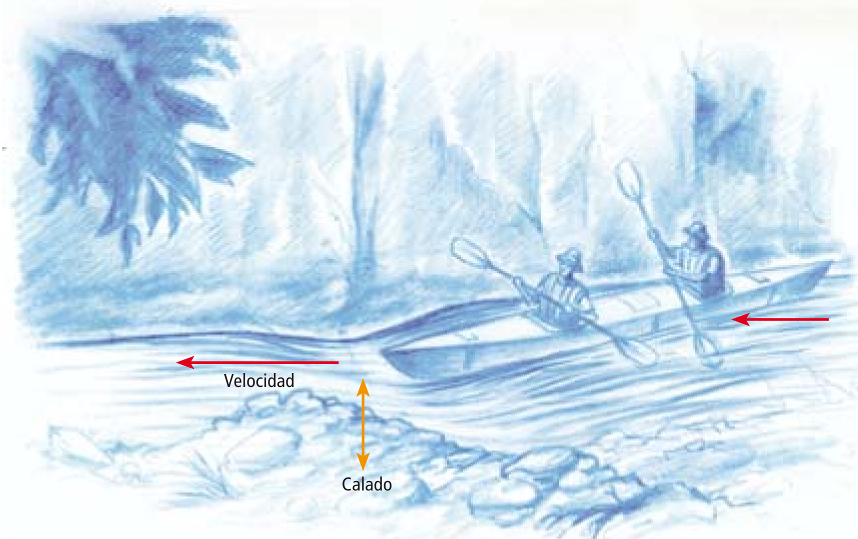
En la práctica, el caudal lo fijan el volumen de las precipitaciones y la extensión de la cuenca fluvial. El calado y la velocidad del agua se ajustan en consecuencia. Si el caudal impuesto por las precipitaciones rebasa al correspondiente a un calado igual a la profundidad del lecho, sobreviene una inundación. En el caso del Sena, el caudal puede variar desde unos 80 metros cúbicos por segundo en período de gran estiaje, hasta 2600 metros cúbicos por segundo en caso de crecida excepcional. El calado varía, pues, en un factor de ocho.

Un equivalente al número de Mach

¿Qué ocurre con el calado y con la velocidad de la corriente cuando una protuberancia en el lecho del río perturba el curso de agua? Sigamos el movimiento de una sección de agua cuando franquea el obstáculo. Si éste es pequeño en



2. Cuando la corriente es rápida, la presencia de una protuberancia en el fondo del lecho provoca la disminución de la velocidad del agua en ese lugar, al igual que un ciclista a piñón libre se decelera al subir una pendiente. Como el caudal no varía, aumenta el calado.



3. Cuando la corriente es lenta, la energía cinética no basta para que el agua remonte por completo el obstáculo. En su lugar, el calado disminuye en el lugar de la protuberancia, lo que crea una cavidad en la superficie del agua. En cambio, la corriente se acelera.

comparación con la masa de agua, la disipación de energía es despreciable y la energía del agua puede considerarse constante. Así ocurre también con el caudal, ya que la cantidad de agua entre dos puntos a lo largo del curso se conserva.

Dos casos extremos aclaran los comportamientos posibles del agua ante un obstáculo. Consideremos primero un torrente rápido. Al igual que un ciclista al pasar por encima de un resalte a piñón libre, la velocidad del agua va a disminuir: la energía cinética se convierte en energía potencial gravitatoria para superar el obstáculo. La conservación del caudal implica que el calado ha de aumentar.

Para una misma protuberancia, cuanto menor sea la velocidad de la corriente, más importancia cobrará la disminución de la velocidad. Por tanto, lo mismo ocurrirá con la variación del calado y, en consecuencia, con la energía necesaria para salvar el obstáculo. Hay que "pagar" por elevar el centro de gravedad de la sección de agua, y ello es tanto más difícil cuanto menor es la velocidad de la corriente.

Puede ocurrir que la velocidad sea tan reducida que la energía cinética de la sección de agua no baste para contribuir a la energía potencial necesaria. El comportamiento del agua cambia entonces de manera radical. Como ya no es posible transformar suficiente energía cinética en energía potencial, sucede precisamente lo contrario: sobre la protuberancia, disminuye el calado; el centro de gravedad de la sección de agua desciende y la disminución de energía potencial se recupera en forma de energía cinética, con lo que ésta aumenta y, con ella, la velocidad de la corriente.

Volvemos a encontrar un comportamiento similar cuando el curso de agua se estrecha, ya sea de forma natural o debido a la presencia de los arcos de un puente. Si la corriente es rápida (régimen torrencial), el calado aumentará y disminuirá la velocidad. En caso contrario (régimen fluvial), el calado disminuye pero aumenta la velocidad de la corriente.

¿Cómo determinar si una corriente exhibirá un comportamiento fluvial o torrencial? La respuesta se obtiene al hallar el cociente de la energía cinética entre la energía potencial gravitatoria media asociada al calado. La raíz cuadrada de ese cociente, el "número de Froude", es igual a la velocidad de la corriente dividida por la raíz cuadrada del producto del calado por la aceleración de la gravedad. El divisor de este cociente coincide con la velocidad de propagación de las ondas en el agua; así pues, el número de Froude es el equivalente hidráulico al número de Mach en los gases. Si la velocidad de la corriente es menor que la velocidad de las ondas, el número de Froude es menor que uno y el régimen de la corriente es fluvial. Para una pendiente más fuerte, o un caudal más voluminoso, el número de Froude será mayor que uno. Se trata de la analogía exacta de la transición entre un régimen subsónico y uno supersónico en los gases.

Ello queda bien ilustrado en el caso de una corriente que circula sobre un fondo irregular. En régimen fluvial, la superficie apenas se muestra ondulada. En cambio, cuando el régimen es torrencial, aparece una estela análoga a la estela sonora de los aviones supersónicos. Las leves ondulaciones creadas por el obstáculo se propagan y son arrastradas por la corriente. A ello responden las líneas diagonales que aparecen dibujadas sobre la superficie del agua, análogas al cono de Mach que crean los aviones en el aire cuando rompen la barrera del sonido.

Preferencias colectivas

La tragedia del teorema de Arrow

Agustín Rayo

Cada miembro de una comunidad posee su propio sistema de preferencias. Hay quien prefiere que exista una religión oficial y hay quien desea vivir en un estado laico. Hay a quien opta por el acceso a una educación gratuita, aunque ello implique altos impuestos, y hay quien se inclina por pagar menos impuestos.

Esas son las preferencias de los miembros de la comunidad. Pero, ¿cómo determinar cuáles son las preferencias de la *comunidad*? ¿Cómo saber, por ejemplo, qué es lo que desea la sociedad española considerada como un todo? ¿Prefiere pagar impuestos altos para disfrutar de más servicios públicos, o desea cotizar menos?

Si todos los españoles estuvieran de acuerdo, el problema no revestiría demasiada dificultad. Podríamos decir que las preferencias de la sociedad española son idénticas a las de cada uno de los españoles. Pero no todos los españoles están de acuerdo. Por tanto, el problema de determinar las preferencias de la sociedad española a partir de las preferencias de los españoles resulta no trivial.

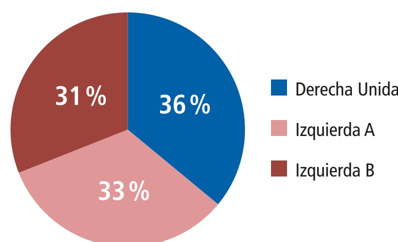
Elección de gobernantes

En la práctica, el problema de identificar preferencias colectivas se manifiesta cuando los miembros de una comunidad eligen a sus gobernantes. Quisiéramos que los gobernantes de una sociedad velaran por los intereses *de la sociedad*, no por sus intereses personales. Y ello presupone que el concepto de "los intereses de la sociedad" está bien definido.

Uno podría pensar que las preferencias de una sociedad son simplemente aquellas compartidas por el mayor número de personas. De ser así, el método más justo para elegir gobernantes consistiría en un sistema de votación por mayoría simple, según el cual el vencedor de unas elecciones es el candidato que obtiene el mayor número de votos.

Muchos países recurren a las votaciones por mayoría simple para nombrar a sus líderes. El presidente de México, por ejemplo, es elegido mediante una votación en la que cada ciudadano vota por un solo candidato, y el vencedor es el que ha logrado el mayor número de sufragios.

Desafortunadamente, no parece claro que en las votaciones por mayoría simple siempre resulte elegido el gobernante que mejor representa los intereses de la sociedad. Imaginemos una situación en la que casi dos terceras partes de la población (un 64 %) prefiere un gobierno de izquierda, mientras que el resto (un 36 %) se inclina por uno de derecha. Aunque existe un solo partido de derecha (Derecha Unida), la izquierda se encuentra dividida en dos partidos de envergadura similar (Izquierda A e Izquierda B). A pesar de que una mayoría de la población prefiere un gobierno de izquierda, en una votación por mayoría simple vencería el partido de la derecha.

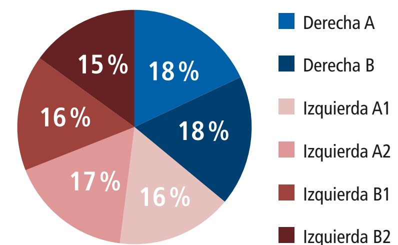


Algunos estados han intentado eliminar este problema implementando un sistema electoral a dos vueltas. El presidente de Francia es elegido de esa manera. En la primera vuelta, cada ciudadano vota por un candidato. Si algún aspirante obtiene mayoría absoluta, es declarado vencedor. En caso contrario, tiene lugar una segunda ronda que se decide por mayoría simple y a la que concurren sólo los dos candidatos más votados en la primera vuelta.

En nuestro ejemplo hipotético con dos partidos políticos de izquierda, Izquierda B quedaría eliminada tras la primera votación. Pero parece razonable esperar que Izquierda A resultaría vencedora en la segunda vuelta.

Por desgracia, los sistemas a dos vueltas también pueden arrojar resultados contrarios a lo que parecería ser la opinión mayoritaria. Imaginemos que en cada uno de los partidos de nuestra sociedad hipotética existen luchas internas y que cada fuerza queda fragmentada en dos nuevos partidos de tamaños similares. En una votación a dos vueltas ganaría uno de los partidos de derecha, a pesar de que la mayoría de la población se decanta por un gobierno de izquierda.

Un problema fundamental de los sistemas de votación por mayoría simple



es que penalizan a los aspirantes con opciones semejantes, lo que genera presión para minimizar el número de partidos políticos. Y en un sistema con pocos partidos políticos, los grupos minoritarios suelen estar peor representados. Por ejemplo, resulta más difícil hacer prosperar un partido que represente los intereses de una minoría étnica, o un partido ecologista.

Los sistemas parlamentarios suelen ser más tolerantes hacia los partidos pequeños. Imaginemos un sistema electoral en el que cada fuerza política obtiene un diputado por cada punto porcentual del voto ciudadano que consigue capturar. En cualquiera de nuestros escenarios hipotéticos anteriores, el resultado sería una cámara con 36 diputados de derecha y 64 diputados de izquierda. Ello posibilitaría que los candidatos de izquierda formasen una coalición y eligiesen a un presidente de Gobierno de izquierda.

Lamentablemente, los sistemas parlamentarios también sufren problemas intrínsecos. Uno de ellos radica en que partidos muy pequeños pueden acaparar mucho más poder de lo que parecería razonable. Pensemos en una cámara con 401 diputados: 200 pertenecen a un partido de derecha moderada, 200 a un partido de izquierda moderada, y el diputado restante resulta provenir de un partido neonazi. Supongamos, además, que la elección del presidente del Gobierno requiere una mayoría absolu-

ta (201 votos). En una situación como ésta, ningún partido lograría gobernar sin haber formado antes una coalición. Pero dos partidos cualesquiera, incluido el partido neonazi, se encuentran en condiciones de formar una coalición victoriosa. Ello otorgaría al partido neonazi (con un solo representante sobre 401 posibles) tanto poder en la cámara como a cualquiera de los otros dos.

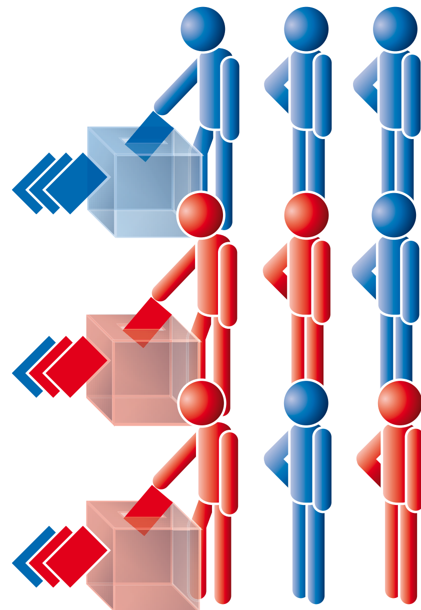
Además, es importante notar que los sistemas parlamentarios presuponen que la sociedad cuenta con un sistema para elegir a los diputados. Pero el método de elección de diputados puede introducir problemas. Consideremos por ejemplo un país dividido en regiones, cuyo parlamento se compone de un diputado por región; además, cada región elige a su diputado mediante un sistema de votación por mayoría simple.

En un sistema tal puede ocurrir que un partido obtenga la mayoría absoluta en el congreso a pesar de que la mayoría de la población haya votado por un partido distinto. Supongamos que hay 20 regiones y que cada una cuenta con 100 electores. En 11 de las 20 regiones, 51 personas votan por el partido de izquierda y 49 lo hacen por el partido de derecha. En las otras 9 regiones, todos los electores votan por el partido de derecha. En la cámara resultante, el partido de izquierda habría obtenido 11 de los 20 escaños, a pesar de que casi el 72 % de los votos habrían ido a parar al partido de derecha. Una situación de este tipo ocurrió en la elección presidencial de 2000 en EE.UU., cuando George W. Bush alcanzó una mayoría absoluta en el colegio electoral a pesar de que su contrincante, Al Gore, obtuvo un mayor porcentaje de los votos de los ciudadanos. Algo similar ocurrió en las últimas elecciones generales en el Reino Unido. El Partido Laborista obtuvo el 39,7 % de los escaños con el 29 % de los votos, mientras que el Partido Liberal Demócrata obtuvo el 8,8 % de los escaños, pese a contar con un 23 % del total de votos.

¿Existe un sistema “justo”?

¿Cuál es, entonces, el sistema electoral que debemos utilizar? ¿De qué manera podríamos asegurarnos de que nuestros gobernantes representan los intereses de la sociedad y no sólo los de una minoría?





Es posible manipular los distritos electorales para que un partido minoritario obtenga una mayoría absoluta de representantes. En este ejemplo hay tres distritos y el partido rojo gana en dos de ellos (*abajo*), a pesar de tener menos votantes que el partido azul (*arriba*).

Existe un teorema que sugiere que la pregunta anterior carece de respuesta satisfactoria. En su tesis doctoral de 1951, el economista Kenneth Arrow, ganador del premio Nobel y profesor emérito en la Universidad de Stanford, demostró que cualquier sistema de votación posible adolece de algún problema como los que hemos estado discutiendo.

En concreto, el teorema de Arrow demuestra que no existe ninguna manera de definir las preferencias de una colectividad a partir de las preferencias de sus miembros de tal modo que se satisfagan todas las propiedades siguientes:

1. *Dominio universal*: El procedimiento ha de arrojar resultados con independencia de cuáles sean las preferencias de los miembros de la colectividad.

2. *Unanimidad:* Cuando todos los miembros de la colectividad prefieran alguna alternativa, también la colectividad ha de preferir esa alternativa.

3. *Independencia de alternativas irrelevantes:* Las preferencias de la colectividad con respecto a una familia de alternativas ha de depender sólo de las preferencias de los miembros de la colectividad con respecto a esas alternativas.

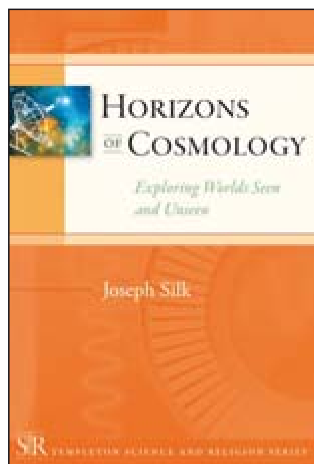
4. *Ausencia de dictadura:* El procedimiento para definir las preferencias de la comunidad no debe ser tal que garantice que éstas coincidirán siempre con las de cierto individuo, independientemente de cuáles sean las preferencias de los demás.

Un procedimiento basado en una votación por mayoría simple satisface las condiciones 1, 2 y 4, pero no la condición 3. En nuestro primer ejemplo hipotético, la colectividad “prefiere” al partido Izquierda A sobre el partido Derecha Unida (porque, en unas elecciones a las que sólo concurriesen esos dos partidos, ganaría Izquierda A), pero la colectividad “prefiere” al partido Derecha Unida sobre los partidos Izquierda A e Izquierda B (ya que, si a la votación se presentan los tres partidos, Derecha Unida resultará vencedora).

Aunque el teorema de Arrow es matemáticamente impecable, diferentes personas han extraído de él lecciones diversas. Yo creo que la lección correcta es la siguiente: en ciertos casos particulares (como cuando todos los miembros de la colectividad comparten las mismas preferencias) tiene sentido hablar de preferencias colectivas; pero, en general, *no existe tal cosa como las “preferencias de la colectividad”*.

Cuando los miembros de una sociedad se decantan por un sistema electoral, a lo máximo a lo que pueden aspirar es a un acuerdo acerca del tipo de problemas a los que están dispuestos a enfrentarse. ¿Qué resulta menos malo, la posibilidad de que los intereses minoritarios adquieran más poder de lo que parece razonable, o dificultar que obtengan representación? Trágicamente, no hay tal cosa como el sistema electoral “objetivamente correcto”.

Agustín Rayo es investigador en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.



HORIZONS OF COSMOLOGY. EXPLORING WORLDS SEEN AND UNSEEN,

por Joseph Silk. Templeton Press; West Conshohocken, 2009.

Cosmología al límite

Materia oscura y otras conjeturas

Cerca ya del final del libro, el autor cita una declaración de Donald Rumsfeld (ex ministro de defensa de los Estados Unidos), que transcribo a renglón seguido: "Hay cosas que sabemos que las sabemos. Hay otras que sabemos que no las sabemos. Y luego están las que no sabemos que no las sabemos." Con esta frase se podría resumir, si no el contenido del libro, sí al menos su espíritu.

Desde hace más o menos un siglo, la cosmología ha dejado el ámbito de la especulación pura, ya que ahora es posible contrastar empíricamente las teorías. Disponemos de datos fiables, corroborados por diferentes métodos, que nos permiten al menos elaborar una explicación convincente de la historia del universo, calcular su edad, proporcionar la escala de sus dimensiones y, en general, dar respuesta a las cuestiones básicas de la astrofísica. La teoría sobre el origen del universo que goza de mayor aceptación es la de la gran explosión, pues cuadra bastante bien con los datos experimentales.

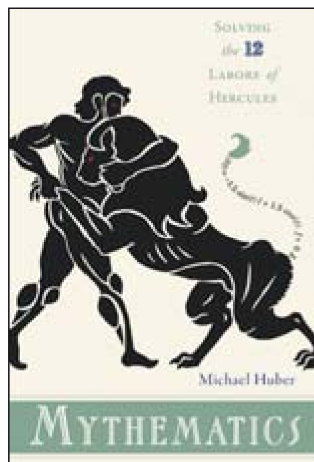
Sin embargo, las consecuencias lógicas de los datos a veces dan lugar a contradicciones difíciles de resolver. El dilema que suele plantearse es una inconsistencia entre la física tal como la conocemos actualmente y los datos medidos, una incompatibilidad que no sabemos eludir en el marco de los conocimientos actuales. Es decir, suponiendo que las observaciones sean correctas, el dilema sólo puede resolverse con una física nueva o postulando la existencia de entes que por ahora nos resultan misteriosos.

Un caso puede resultar emblemático. Desde hace varios decenios se sabe que la velocidad de rotación de las galaxias no es congruente con la masa que tienen si se calcula a partir de las estrellas que se ven. La única manera de salir del embrollo consiste en postular que existe una cierta clase de materia invisible, cuyas propiedades (hipotéticas) poco a poco se van circunscribiendo. Debe ser un tipo de materia con interacciones muy débiles y distinta de la que conocemos: le llaman *materia oscura*. La otra posibilidad es que las leyes de física habitualmente aceptadas no rijan en toda circunstancia.

Aparte de la velocidad de rotación de las galaxias hay más datos que reclaman o bien la existencia de materia oscura, o bien una nueva física. De forma análoga, la teoría de la gran explosión, conjugada con los datos observacionales, exige la existencia de una *energía oscura* de características insólitas. Algo en todo esto recuerda al éter, del que nos desembarazamos no ha mucho... ¿Qué será de la materia oscura y de la energía oscura dentro de un siglo? ¿Adquirirán carta de ciudadanía o dormirán junto al éter en el cajón de las ideas desechadas? Es difícil hacer conjeturas. En cualquier caso, es una preocupación que atormenta hoy a los científicos; estos dilemas realmente hacen que la elaboración teórica de la cosmología, en su estado actual, se tambalee.

Entrar en tales disquisiciones no es, desde luego, apto para todos. Si bien el autor se guarda mucho de emplear un lenguaje técnico o inaccesible, puede que estos temas le resulten extravagantes al advenedizo. Se han publicado otros libros de divulgación más sencillos y asequibles. Además, a quien desconozca el normal funcionamiento del trabajo científico le puede dar la impresión de que todo es incierto y dudoso. Es necesario parar mientes en que no toda la ciencia es así, que explorar los límites del conocimiento no es lo mismo que moverse por terreno más firmemente asentado. Este aspecto, evidente para algunos, puede acabar por confundir a quien carezca de formación científica.

Angel Garcimartín



MYTHEMATICS. SOLVING THE 12 LABORS OF HERCULES,

por Michael Huber. Princeton University Press; Princeton, Nueva Jersey, 2009.

Héroes y matemáticas

Resolución de problemas

Recuerdo perfectamente —cursaba quinto de bachillerato— cuando leí *Puzzle-math*, de George Gamow y Marvin Stern. Con él descubrí que, además de los problemas *formales* que resolvíamos en la escuela, con los que disfrutaba porque, como el latín, ponían en "jaque" mi capacidad de reflexionar y de organizar el cerebro, había una forma lúdica de plantear problemas de un cierto nivel por medio de narraciones cortas con protagonistas como el gran sultán Ibn-al-Kuz de Quasiababia, su visir y su hija, o Sammyroulette. En él hallé los primeros pro-

blemas de probabilidad en términos de juegos de cartas.

En uno de sus últimos libros (*Mythematics*), Michael Huber, profesor de matemáticas en la Universidad Muhlenberg (Pennsylvania), recurre a los "doce trabajos de Hércules". En el apéndice B (*Hercules before the Labors*) recoge este personaje heredado de la cultura griega, que conforma una forma de ver el mundo: ante los retos que nos depara el destino hay que actuar y, siempre que se pueda, vencer.

Ofrece un buen modelo para la resolución de problemas matemáticos. De hecho, un problema matemático puede considerarse un "reto" que debemos vencer con nuestro ingenio y tesón. Siempre hay algún camino —quizá no el más corto, ni el más desbrozado—, y siempre debemos acometer la andadura.

Así, en este diálogo entre *mito* y *matemáticas* —de ahí el título del libro— Huber, con gran ingenio, plantea una treintena larga de problemas ("tareas") que nos invita a superar. Cubren doce campos de la matemática: álgebra (6), combinatoria (1), ecuaciones en diferencias (3) y diferenciales (8), cálculo diferencial (3), geometría (3), cálculo integral (6), cálculo de varias variables (2), probabilidad (3), simulaciones (1), estadística (1) y trigonometría (1).

Son problemas de dificultad irregular: los hay —los menos— bastante sencillos y que pueden ser resueltos ya en bachillerato; el resto —más de las dos terceras partes— deben ser abordados por alumnos de los primeros cursos de una enseñanza universitaria de ciencia o ingeniería. Se llega a usar incluso la *transformada de Laplace* (apéndice D).

A pesar del esfuerzo del autor, que ofrece las soluciones con rigor y claridad, cabe decir que el texto literario que relata los problemas carece del frescor de la obra de Gamow y Stern.

Sin embargo, debemos congratularnos de disponer de libros como este, en días como los actuales en los que, en nuestro entorno más inmediato, existe un cierto desencanto por la matemática como ciencia en sí misma y no como herramienta auxiliar para otras disciplinas. Según George Pólya, padre de la *resolución de problemas*, cabe entender la matemática como la "ciencia que resuelve problemas". Asimismo, propone como metodología para acercarse a su naturaleza, a su plausibilidad, a su comprensión, precisamente la metodología que adopta Hércules frente a sus trabajos. La misma que ofrece Huber en su texto.

Los textos "rígidos", indispensables para una formación auténtica, deberían acompañarse, sin aprensión y con naturalidad, de textos "ligeros" (lúdicos). Los enseñantes de cualquier nivel deberíamos familiarizarnos con ellos para poder indicar a nuestros alumnos este o aquel problema. Y los alumnos más aventajados deberían leerlos.

En esta línea trabajó también, mucho y bien, nuestro desaparecido colega Miguel de Guzmán, a quien —creo— este libro le habría encantado. A buen seguro nos habría ofrecido una recensión más instructiva que la mía.

Con todo, repito, debemos agradecer al autor de *Mythematics* su trabajo, su esfuerzo. Ahora nos toca a todos nosotros hacer un esfuerzo para que esta y otras obras análogas no caigan en saco roto.

Josep Pla i Carrera



CRACKING THE EINSTEIN CODE. RELATIVITY AND THE BIRTH OF BLACK HOLE PHYSICS,

por Fulvio Melia. The University of Chicago Press; Chicago, 2009.

Agujeros negros

Desarrollo de la astrofísica teórica

La *ecuación de Einstein* —de la teoría de la relatividad general, formulada en 1915— se puede entender como un conjunto de seis ecuaciones independientes e interconectadas que relacionan la gravedad (descrita por el *tensor métrico*) y la materia (descrita por el *tensor energía-impulso*). Para objetos no muy masivos ni muy veloces, dicha ecuación conduce a la ley de la gravitación de Newton. Fulvio Melia, profesor de la Universidad de Arizona y especialista en astrofísica teórica, ha escrito este corto libro (137 páginas, sin una sola expresión matemática) con el fin de poner de manifiesto el contexto en el que se enmarca el descifre del *código de Einstein*: una metáfora empleada para referirse a la solución encontrada para aquella ecuación por el matemático neozelandés Roy Kerr en 1963.

A tal fin Melia ha echado mano de la historia, aunque de una historia *sui generis*, pues no es un historiador profesional. Aunque anecdóticamente, ello se nota ya en el prólogo, donde da por bueno que Galileo declinó en 1638, cinco años después de la condena de la iglesia católica y bajo arresto domiciliario, una oferta de la Universidad de Harvard (fundada en 1636) para formar parte de su profesorado. Una vieja leyenda que los historiadores nunca han considerado demostrada.

Melia comienza describiendo sucintamente las contribuciones de las principales figuras que, en su opinión, abonaron el camino para la irrupción de Kerr. Ante el lector desfilan figuras de la talla de K. Schwarzschild, quien en 1916 encontró una primera solución de la ecuación de Einstein, para el caso del campo gravitatorio creado por una masa esférica homogénea y estática. De dicha solución se desprendía la posible existencia de *agujeros negros*: terminología acuñada en 1967 por J. A. Wheeler para referirse a objetos con un campo gravitatorio tan intenso que ni siquiera la luz puede escapar de ellos.

Tras comentar la gran crisis en la que pronto se sumieron las investigaciones sobre relatividad general, el autor se concentra en el renacimiento de las mismas

a comienzos del decenio de los sesenta, debido a dos causas: cada vez se observaban mayores pruebas de la existencia de agujeros negros y, además, pronto apareció la notabilísima aportación teórica de Kerr, quien en un artículo de menos de dos páginas, presentaba una solución de la ecuación de Einstein que describía el comportamiento de objetos de gran masa (entre ellos, los agujeros negros) en rotación a ritmo constante; solución que coincide con la propuesta por Schwarzschild cuando no hay rotación.

El resto del libro está dedicado a diversos aspectos relacionados con la solución de Kerr y con su gran influencia en el desarrollo de la física de los agujeros negros. Tal vez la particularidad más interesante del libro sea, precisamente, el haber tomado como hilo conductor las contribuciones de Kerr en su contexto, pues supone poner de manifiesto el carácter humano del conocimiento científico, con todo lo que ello conlleva de desmitificador. Pero, a pesar de la ausencia de formalismo matemático explícito, no se trata de un libro para legos en la materia. Los iniciados, por el contrario, lo encontrarán ameno al ligar el desarrollo de una parte importante de la astrofísica teórica moderna con las peripecias de Roy Kerr. En cualquier caso, el lector no va a encontrar en este libro una historia de la relatividad general; ni siquiera de la historia de las soluciones de la ecuación de Einstein. Por ejemplo, no existe la mínima mención a las relevantes aportaciones en este campo de Friedmann, Lamaître, Robertson o Walker, entre otros.

Luis Navarro Veguillas



LEIBNIZ, GOTTFRIED WILHELM: ESCRITOS CIENTIFICOS (VOL. 8 DE OBRAS FILOSOFICAS Y CIENTIFICAS).

Dirigido por Juan Arana y publicado por la Sociedad Española Leibniz. Editorial Comares; Granada, 2009.

Filosofía de la ciencia

Pensamiento leibniziano

Que Leibniz sea un pensador clásico de extraordinaria importancia histórica, tanto en el ámbito filosófico como en el científico, es algo indudable. Su obra alcanza en ambos terrenos cotas realmente difíciles de superar en cuanto a su significación e influencia desde su época a nuestros días, de ahí que una edición crítica selectiva de escritos suyos, realizada con la calidad de la presente, ha de ser especialmente bienvenida.

Es preciso comenzar felicitando al coordinador responsable, Juan Arana, por esta magnífica compilación de escritos del filósofo alemán, que constituye el octavo volumen de un gran proyecto de publicación en español de obras leibnizianas —llevado a cabo por un grupo de especialistas coordinados por J. A. Nicolás— y que abarca diecinueve volúmenes. Su extenso conocimiento de Leibniz y del siglo XVII filosófico y científico se muestra permanentemente a lo largo de todo el volumen (citas, acotaciones, introducción, etcétera). Igualmente hay que agradecer a la Editorial Comares, tanto por haber acometido la publicación de un volumen de estas características en los tiempos que corren como por la muy cuidada impresión del volumen y la pulcritud del mismo.

Se trata de una extensa colección de escritos del filósofo alemán, de muy diversa índole y origen (pequeños tratados, cartas, fragmentos de opúsculos), muchos de los cuales además encuentran ahora su primera publicación en español. De todos los escritos se ofrece, al principio de cada uno, una completa ficha bibliográfica (título original, fecha, manuscrito, edición utilizada, otras ediciones, ediciones anteriores en castellano, traductor, autor de las notas y contexto y relevancia del texto). A destacar especialmente esta última característica, pues sitúa cada texto en el conjunto de la obra leibniziana poniéndolo en relación con otros y dando noticia histórica de su origen en la fecha determinada de su redacción. De este modo, se orienta fidedignamente al lector sobre el significado del texto incluido y se facilita su comprensión y alcance histórico. Lógicamente, las ediciones utilizadas para las traducciones son de primera referencia internacional. En total, el volumen contiene cuarenta y cinco escritos de Leibniz dentro de la rúbrica “Escritos Científicos”.

El aparato crítico que acompaña a cada texto es claro, exhaustivo y extraordinariamente útil. Abre la edición una extensa “Introducción” general a la obra que también destaca por su claridad y su acertada selección temática, a fin de informar al lector y situarlo en una adecuada óptica para sacar el máximo partido en el manejo de los textos recogidos. Mención específica merecen los índices que complementan el conjunto: de nombres, de siglas y abreviaturas, y de conceptos. Este último es de particular relevancia por cuanto singulariza la ubicación precisa de tales conceptos, filosóficos y científicos, en cada texto del pensador alemán, proporcionando una inmejorable guía para la consulta y utilización del volumen.

Completan la edición aspectos bibliográficos de especial significación. De un lado, la inclusión de una lista de otras ediciones de Leibniz, lo cual muestra el gran conocimiento del editor y del equipo investigador en su conjunto de las publicaciones de la obra de Leibniz. De otro lado, la añadidura de una bibliografía secundaria sobre el pensamiento leibniziano en varios idiomas, que proporciona un elenco crítico de obras sobre el mismo de reconocida calidad, muchas de ellas consideradas ya estudios clásicos de obligado conocimiento para cualquier trabajo sobre el filósofo alemán.

En definitiva, una edición crítica de escritos de Leibniz que satisface ampliamente los indicadores internacionales de calidad, que será básica para cualquier investigación sobre el pensamiento leibniziano en cuanto a los textos que la componen, y que además publica por primera vez en español muchos de ellos.

Ramón Queraltó

EN EL PROXIMO NUMERO DE SEPTIEMBRE 2010



¿Pierde energía el universo?

por Tamara M. Davis

La energía total debe conservarse. Cualquier estudiante de física conoce esta ley fundamental. El problema es que no puede aplicarse al universo en su conjunto.

De aguas sucias, energía limpia,

por Jane Braxton Little

Las ciudades de California producen electricidad mediante el tratamiento y bombeo de las aguas residuales del subsuelo.





Victoria alada,

por Gareth Dyke

Las aves modernas, que hace algún tiempo se creía que surgieron sólo tras la extinción de los dinosaurios, vivieron junto a ellos.

Fármacos basados en ADN,

por Matthew P. Morrow y David B. Weiner

Tras años de intentos fallidos, una nueva generación de vacunas y medicamentos contra el VIH, la gripe y otras enfermedades persistentes se encuentra en fase de ensayos clínicos.

Así piensan los niños,

por Alison Gopnik

Los niños, incluso los más pequeños, saben, experimentan y aprenden mucho más de lo que se imaginó posible.

